

10/542638

JC14 [redacted] c'd PCT/PTO 19 JUL 2005

5015.1012

UNITED STATES PATENT & TRADEMARK OFFICE

Re: Application of: **Anton SEELIG et al.**

Serial No.: To Be Assigned

Filed: Herewith as national phase of International
Application No. PCT/EP2003/014214, filed 13 December
2003

For: **DEVICE AND METHOD FOR TRANSMITTING
AND PROVING THE ENERGY OF CAPACITIVE
ACTUATORS**

LETTER RE: PRIORITY

Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

July 18, 2005

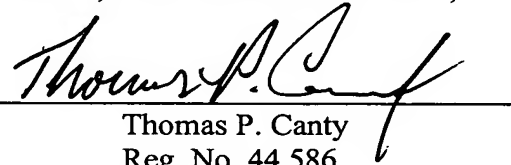
Sir:

Applicant hereby claims priority of German Application Serial No. 103 01 978.2, filed 20
January 2003, through International Application No. PCT/EP2003/014214, filed 13 December
2003.

Respectfully submitted,

DAVIDSON, DAVIDSON & KAPPEL, LLC

By



Thomas P. Canty
Reg. No. 44,586

Davidson, Davidson & Kappel, LLC
485 Seventh Avenue, 14th Floor
New York, New York 10018
(212) 736-1940

BEST AVAILABLE COPY

BUNDE REPUBLIK DEUTSCHLAND

PCT/EP 03 / 1 4 2 1 .

Rec'd PCT/PTO 19 JUL 2005

EP/03/14214
10/542638



**PRIORITY
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

REC'D 25 FEB 2004

WIPO PCT

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen:

103 01 978.2

Anmeldetag:

20. Januar 2003

Anmelder/Inhaber:

Eurocopter Deutschland GmbH,
86609 Donauwörth/DE

Bezeichnung:

Vorrichtung und Verfahren zum Übertragen und
Bereitstellen der Energie kapazitiver Aktuatoren

IPC:

H 02 J, H 02 N und B 64 C

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 13. Januar 2004
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Wallner

Vorrichtung und Verfahren zum Übertragen und Bereitstellen der Energie kapazitiver Aktuatoren

5 Patentansprüche

- 10 1. Vorrichtung zur berührungslosen elektrischen Energieübertragung und/ oder Kontrolleinrichtung in einem System, umfassend mindestens ein stationäres und ein bewegbares Teil, zwischen denen Energie zu übertragen ist, mit mindestens einem zu steuernden und mit Energie zu versorgenden Mittel im bewegbaren Teil, dadurch gekennzeichnet, dass ein Reihenschwingkreiskondensator (C_G) eines
- 15 Frequenzgenerators an eine Primärwicklung (3a) eines eine Trennstelle (3c) zwischen dem stationären Teil und dem bewegbaren Teil überbrückenden induktiven Übertragers angeschlossen ist und dass eine auf dem bewegbaren Teil angeordnete Sekundärwicklung (3b) des Übertragers an wenigstens eine Aktuatorstelleinrichtung (4) in der Form einer Matrixanordnung (4a, 4b, 4c) von schaltbaren Leistungshalbleitern
- 20 (S_1, \dots, S_4) angeschlossen ist.
2. Vorrichtung zur elektrischen Energieübertragung und/oder Kontrolleinrichtung in einem System, in dem Energie zu übertragen ist, mit mindestens einem zu steuernden
- 25 und mit Energie zu versorgenden Mittel, gekennzeichnet durch folgende Merkmale:
- einem Frequenzgenerator (2), bestehend aus einem Wechselrichter mit schaltbaren Halbleiterschaltern (T_1 - T_4) in Matrixanordnung und einem nachgeschalteten Reihenschwingkreis (L_G, C_G), dessen Resonanzfrequenz (f_G) mit der Wechselrichterfrequenz (f_w) übereinstimmt,
 - 30 - einer dem zu steuernden und mit Energie zu versorgenden Mittel zugeordneten Stelleinrichtung (4), die eine Matrixanordnung (4a, 4b, 4c) von schaltbaren Leistungshalbleitern (S_1, \dots, S_4) in enthält, welche den an einem Reihenschwingkreiskondensator (C_G) des Frequenzgenerators (2) abgenommenen Strom (i_G, i) getrennt nach positiven und negativen Halbschwingungen oder Abschnitten

aus diesen Halbschwingungen in das zu steuernde und mit Energie zu versorgende Mittel (5, 5a) einprägt.

- 5 3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch folgende Merkmale:
- a) zur Bildung einer Ausgangsspannung (u'_A , u_A) der Stelleinrichtung (4) mit nur einer Polarität der Ausgangsleiter (A, B') enthält die Aktuatorstelleinrichtung (4a, 4b) unipolare schaltbare Leistungshalbleiter (S1, ..., S4) in Matrixanordnung,
 - b) die unipolaren schaltbaren Leistungshalbleiter sind auf die Polarität der
- 10 Ausgangsspannung bezogen eingesetzt, in der sie die Ausgangsspannung (u'_A , u_A) als Sperrspannung aufnehmen und den Strom ($-I_A$) vom positiven Ausgangsleiter zu einem Wechselstromeingang abschalten.
- 15 4. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass zur Bildung einer Ausgangsspannung (u'_A , u_A) der Stelleinrichtung (4) mit wechselnder Polarität der Ausgangsleiter (A, B') die Aktuatorstelleinrichtung (4c) bipolare schaltbare Leistungshalbleiter in Matrixanordnung aufweist, die wahlweise positive oder negative Spannungen sperren und Ströme in beiden Stromflussrichtungen abschalten.
- 20
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, gekennzeichnet durch folgende Merkmale:
- die Aktuatorstelleinrichtung (4) weist Mittel zur Regelung (4_R) und zur Steuerung (4_{ST}) des Einprägens von positiven und negativen Halbschwingungen oder Abschnitten von Halbschwingungen des höherfrequenten Wechselstromes (i) in den Aktuator (5, 5a) auf,
 - das Mittel zur Regelung (4_R) ist verbunden mit dem Mittel zur Steuerung (4_{ST}), um über ein Signal (ϕ) in Abhängigkeit von dem Betrag des Unterschiedes ($u_S - u'_A$) zwischen dem Sollwert (u_S) und dem Istwert (u'_A) der Aktuatorspannung unterschiedlich große
- 30 Abschnitte von Halbschwingungen des Stromes (i) zu bilden,
- das Mittel zur Regelung (4_R) ist verbunden mit dem Mittel zur Steuerung (4_{ST}), um über das Signal (G/W) in Abhängigkeit von dem Vorzeichen des Unterschiedes ($u_S - u'_A$) zwischen dem Sollwert (u_S) und dem Istwert (u'_A) der Aktuatorspannung, die

Leistungshalbleiter (S1, S2, S3, S4) in der Weise zu steuern, wobei dem Aktuator (5, 5a) bei negativem Vorzeichen des Unterschiedes ($u_S - u'_A$) von Halbschwingung zu Halbschwingung sukzessive Ladung bzw. Energie entzogen und bei positivem Vorzeichen des Unterschiedes ($u_S - u'_A$) von Halbschwingung zu Halbschwingung sukzessive Ladung bzw. Energie zugeführt wird.

6. Vorrichtung nach Anspruch 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass das zu steuernde und mit Energie zu versorgende Mittel als kapazitiver Aktuator ausgeführt ist.

7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, gekennzeichnet durch folgende Merkmale:

a) das Mittel zur Steuerung (4_{ST}) des Einprägens von Halbschwingungen oder Abschnitten von Halbschwingungen des Wechselstromes (i) in den Aktuator ist Verbunden mit Einrichtungen (4_{S1} , 4_{S2} , 4_{S3}) zur Erzeugung von Signale (SR) eines zum Wechselstrom (i) synchronisierten Schaltrasters,

b) das Mittel zur Steuerung (4_{ST}) umfasst Logikmittel, welche aus Signalen (SR) des Schaltrasters Leitbereichssignale (S10, S30) und (S20, S40) der Grundstellung der in Reihe liegenden Halbleiterschalterpaare (S1, S3) und (S2, S4) bilden,

c) das Mittel zur Steuerung (4_{ST}) umfasst Mittel zur voreilenden Verschiebung der Leitbereiche des Schalterpaares (S2, S4) gegenüber der Grundstellung (S20, S40) im Gleichrichterbetrieb und umfasst Mittel zur nacheilenden Verschiebung der Leitbereiche des Schalterpaares (S1, S3) gegenüber der Grundstellung (S10, S30) im Wechselrichterbetrieb,

d) das Mittel zur Steuerung (4_{ST}) ist verbunden mit dem Mittel zur Regelung (4_R) zur Zuführung eines Signals (G/W) zur Einstellung der Richtung der Verschiebung und eines Signals (φ) zur Einstellung des Maßes der Verschiebung.

8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1, 3 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens wesentliche Teile der Energieübertragung und der Kontrolleinrichtung im Bereich einer das bewegliche Teil bildenden Rotorachse und eines Rotorkopfes eines Drehflügelflugzeugs angeordnet sind.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass in wenigstens einem Rotorblatt des Drehflügelflugzeugs einer oder mehrere kapazitive Aktuatoren angeordnet sind.

10. Vorrichtung nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass am stationären Teil einer Rotorachsenlagerung zur Energieübertragung wenigstens eine Primärwicklung (3a) angeordnet ist, welche mit einer an der Rotorachse angeordneten Sekundärwicklung korrespondiert.

11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass im Bereich der Rotorachse ein Azimut-Sensor angeordnet ist, dessen Ausgang mit der Kontrolleinrichtung verbunden ist.

12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass im Bereich des Rotorblatts wenigstens ein Sensor zur Erfassung der Position eines vom kapazitiven Aktuator betätigten aerodynamisch wirksamen Mittels angeordnet ist, dessen Ausgang mit der Kontrolleinrichtung verbunden ist.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Aktuatorstelleinrichtung (4) und eine zugehörige Steuerelektronik im Rotorkopf angeordnet sind und über in der Rotorachse angeordnete Leitungen mit der berührungslosen Energieübertragung verbunden sind.

14. Verfahren zum Bereitstellen der Energie wenigstens eines kapazitiven Aktuators gemäß der Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1, 3 bis 7, wobei die Aktuatoren auf einem bewegbaren Teilsystem, das durch eine Trennstelle (3c) von einem stationären System getrennt ist, angeordnet sind, gekennzeichnet durch folgende Verfahrensschritte:

- in dem stationären System generiert der Frequenzgenerator (2) aus der Gleichspannung (1) einen Wechselstrom (i_G) höherer Frequenz mit von der Phasenlage und der Amplitude der Gegenspannung (u_G) unabhängigen Amplitude,
- der Wechselstrom (i_G) wird der Primärwicklung (3a) eines die Trennstelle überbrückenden induktiven Übertragers (3) zugeführt,
- der von der Sekundärwicklung (3b) auf dem bewegbaren Teilsystem ausgehende höherfrequente Wechselstrom (i) wird mittels einer Aktuatorstelleinrichtung (4) getrennt nach positiven und negativen Halbschwingungen oder Abschnitten von diesen Halbschwingungen, stets in der Richtung in den Aktuator eingeprägt, dass in jeder Halbschwingung eine Längenänderung (Δs) des Aktuators in der gewünschten Richtung auftritt.

15. Verfahren zum Bereitstellen der Energie wenigstens eines kapazitiven Aktuators gemäß der Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 7, gekennzeichnet durch folgende Verfahrensschritte:

- aus einer Gleichspannung wird durch einen Frequenzgenerator (2) ein Wechselstrom (i_G) höherer Frequenz mit von der Phasenlage und der Amplitude einer Gegenspannung (u_G) unabhängigen Amplitude generiert,
- der höherfrequente Wechselstrom (i) wird mittels einer elektronischen Stelleinrichtung (4) getrennt nach positiven und negativen Halbschwingungen oder Abschnitten von diesen Halbschwingungen stets in der Richtung in den Aktuator eingeprägt, dass in jeder Halbschwingung eine Längenänderung (Δs) des Aktuators in der gewünschten Richtung auftritt.

25

16. Verwendung einer berührungslosen elektrischen Energieübertragung und/ oder Kontrolleinrichtung gemäß den Ansprüchen 1 bis 15 in einem Drehflügelflugzeug.

**Vorrichtung und Verfahren zum Übertragen und Bereitstellen der Energie
kapazitiver
Aktuatoren**

5

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur berührungslosen elektrischen Energieübertragung und Steuerung für ein aus mindestens einem stationären und einem bewegbaren Teil bestehenden System beziehungsweise für ein System, in dem Energie zu übertragen ist, mit mindestens einem zu steuernden und mit Energie zu versorgenden Mittel.

10

In derartigen Systemen müssen bei entsprechendem Bedarf elektrische Energie und Steuersignale vom stationären Teil des Systems in den bewegten Teil des Systems übertragen werden, weil im bewegten Teil zumindest eine Einrichtung, beispielsweise eine Stelleinrichtung, angeordnet ist, die im Betriebsfall mit Energie versorgt werden muss und die funktionsbedingt gesteuert werden muss. Alternativ sind hier auch Systeme in Betracht zu ziehen, bei denen Stelleinrichtungen, wie beispielsweise kapazitive Aktuatoren, über eine bestimmte Entfernung hin betätigt werden müssen.

15

20 Aus der Literatur, siehe z. B. : A. Esser, „A New Approach to Synchronize a Bidirektional DC to DC Converter for Contactless Power Supplies“, ETEP Vol. 3, No. 2, March/April 1993, ist ein Verfahren und eine Anordnungen bekannt, welche die bidirektionale Übertragung elektrischer Energie über Robotergelenke mit beliebig großem Drehwinkel ermöglicht, ohne dass eine elektrisch leitende Verbindung über das Drehgelenk hinweg erforderlich ist. Hierzu wird auf der Eingangsseite des Gelenkes aus einer Gleichspannung mittels eines Wechselrichters eine höherfrequente Wechselspannung gebildet, diese Wechselspannung mittels eines induktiven Übertragers von einer Primärspule des Übertragers auf der einen Seite einer Trennstelle, d. h. eines Luftspaltes, auf eine Sekundärspule, die auf der anderen Seite der Trennstelle liegt, 25 übertragen und dort wieder in eine Gleichspannung zurückgewandelt. Die dabei eingesetzten Gleichspannungs-/ Wechselspannungswandler und Wechselspannungs-/Gleichspannungswandler sind als Wechselrichter ausgebildet, so dass sie bidirektional betreibbar sind und dadurch der Energiefluss umkehrbar ist. Ein Kondensator, der hinter

30

der Trennstelle auf der Sekundärseite aufgeladen wurde, kann entladen werden, indem die Energie wieder über die Trennstelle auf die Primärseite zurückübertragen wird.

Grundsätzlich sind auch Stelleinrichtungen bekannt. Als Beispiel sei hier das Piezo-
5 Element genannt, das als kapazitiver Aktuator in Automobilen, Fluggeräten oder
anderen technischen Geräten dort eingesetzt wird, wo mit hoher Frequenz und mittlerer
Stellkraft Bauteile zu bewegen sind. Dies kann sowohl in der Anordnung einzelner
Stellglieder erfolgen, als auch in der Form von Gruppen mehrerer Stellglieder. Die DE
199 27 087 A1 beschreibt zum letztgenannten Fall ein Verfahren und eine Vorrichtung
10 zum Laden und Entladen mehrerer piezoelektrischer Elemente. Mittels in geeigneter
Weise angesteuerter Lade- und Entladeschalter können jeweils ein oder mehrere
piezoelektrische Elemente umfassende Gruppen unabhängig voneinander geladen oder
entladen werden. Bei dem Energieaustausch zwischen dem sekundärseitigen
Kondensator, der als Pufferkondensator eine größere Kapazität als die Piezoelemente
15 aufweist, wobei beide Kapazitäten im allgemeinen auf unterschiedliche Spannungen
aufgeladen sind, wird der Lade- und Entladestrom in seinem Anstieg durch eine Spule
begrenzt und durch periodisches Schalten, auch Takten genannt, in seiner Höhe
eingestellt. Dieses Takten erfolgt durch Ein- und Ausschalten von Halbleiterschaltern
mit hoher Frequenz, wobei der in einer Spule 2 gespeicherte Lade- oder Entladestrom
20 beim Schalten in den Halbleitern eine hohe Schaltverlustleistung erzeugt. Ein weiterer
Nachteil dieses Verfahrens und dieser Anordnung besteht in der doppelten Wandlung
und der Speicherung der Energie auf dem bewegten System. Die über die Trennstelle,
d.h. den Luftspalt, induktiv übertragene Wechselspannung bzw. der induktiv
übertragene Wechselstrom werden auf dem bewegten System gleichgerichtet und die
25 Energie in einer in der Regel als Elektrolytkondensator ausgebildeten Pufferkapazität,
die noch wesentlich größer als die Kapazität der Piezoelemente ist, gespeichert. Aus der
Pufferkapazität werden dann ein oder mehrere Piezoelemente mit bei hoher Frequenz
getaktetem Strom aufgeladen. Wünschenswert ist dagegen ein Verfahren, das die mit
höherfrequenter Spannung bzw. mit höherfrequentem Strom über die Trennstelle
30 übertragene Energie ohne Zwischenspeicherung den piezoelektrischen Elementen
zuführt.

Der Druckschrift ist jedoch kein Hinweis entnehmbar, auf welche Weise die
Ansteuerung der piezoelektrischen Elemente erfolgen soll, insbesondere wenn letztere

auf dem bewegbaren Teil eines aus einem stationären und einem bewegbaren Teil bestehenden Systems angeordnet sind. Weiterhin ergibt sich bei besonderen bewegten System, die Erschütterungen und/oder hohen Geschwindigkeiten ausgesetzt sind, das Problem, dass bestimmte elektrische Bauteile nicht mehr für diese Betriebsbedingungen geeignet sind. Geht man beispielsweise von einer Anwendung der Vorrichtung im Bereich der Rotorachse und des Rotorkopfes eines Hubschraubers aus, so ist die Verwendung von Elektrolytkondensatoren aus Gründen der hohen mechanischen Belastung prinzipbedingt nicht möglich. Gerade bei Anwendungen mit rauen Umgebungsbedingungen, wie hohen und tiefen Temperaturen und großen Zentrifugalbeschleunigungen auf dem bewegten System, beispielsweise dem Rotorkopf eines Hubschraubers, ist ein Betrieb mit Elektrolytkondensatoren nur bei erheblichen Risiken möglich.

Der Erfindung liegt deshalb die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Energieversorgung und Steuerung von kapazitiven Aktuatoren anzugeben, welche einerseits die Ansteuerung der Aktuatoren über eine bestimmte Entfernung erlauben und welche andererseits die Übertragung der Energie der auf dem bewegbaren Teil des Systems angeordneten Aktuatoren auf das durch eine Trennstelle getrennte bewegbare Teil ermöglichen und die Energie den auf dem bewegbaren Teil angeordneten Aktuatoren nach Maßgabe der gewünschten Kraftwirkungen oder der beabsichtigten Bewegungen zuführen, ohne dass eine Zwischenspeicherung der Energie in einem Elektrolytkondensator auf dem bewegbaren Teilsystem erforderlich ist.

Die Aufgabe wird durch die in den Ansprüchen 1, 2, 14 und 16 wiedergegebenen kennzeichnenden Merkmale in hervorragender Weise gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den kennzeichnenden Merkmalen der nachbezogenen Ansprüche.

Im Rahmen der Erfindung ergeben sich noch weitere Möglichkeiten der Ausgestaltung des Verfahrens und der Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens, die nachfolgend beschrieben werden.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird durch einen Frequenzgenerator 2 ein Wechselstrom i_G höherer Frequenz mit von der Phasenlage und der Amplitude einer

Gegenspannung u_G unabhängigen Amplitude erzeugt und mittels eines induktiven Übertragers 3 auf ein bewegbares Teilsystem übertragen. Der von der Sekundärwicklung des Übertragers ausgehende höherfrequente Wechselstrom i wird mittels einer elektronischen Stelleinrichtung 4 getrennt nach positiven und negativen Halbschwingungen oder Abschnitten dieser Halbschwingungen in der Richtung in den Aktuator eingepreßt, dass in jeder Halbschwingung eine Längenänderung Δs des Aktuators in einer gewünschten Richtung auftritt.

Der Bereich der Betriebsfrequenz des Frequenzgenerators 2 liegt dabei im Bereich zwischen etwa 25 kHz und einigen MHz. Bevorzugt wird der Bereich um 100 kHz. Bei der Wahl der Betriebsfrequenz ist sowohl die zu steuernde Leistung als auch die zu überbrückende räumliche Entfernung vom Frequenzgenerator bis zu den Aktuatoren zu berücksichtigen. Grundsätzlich gilt, dass mit wachsender Leistung und/ oder Entfernung die nutzbare Frequenz sinkt.

Das Verfahren zur Bereitstellung elektrischer Energie für wenigstens einen kapazitiven Aktuator, der auf dem bewegbaren Teil angeordnet ist, ist dadurch gekennzeichnet, dass der Frequenzgenerator 2 im stationären Teil aus der Gleichspannung 1 einen Wechselstrom i_G höherer Frequenz mit von der Phasenlage und der Amplitude der Gegenspannung u_G unabhängigen Amplitude erzeugt und dass der Wechselstrom i_G der Primärwicklung 3a des die Trennstelle überbrückenden induktiven Übertragers zugeführt wird, wobei der von der Sekundärwicklung 3b auf dem bewegbaren Teilsystem ausgehende höherfrequente Wechselstrom i wird mittels einer elektronischen Stelleinrichtung 4 getrennt nach positiven und negativen Halbschwingungen oder Abschnitten von diesen Halbschwingungen, stets in der Richtung in den Aktuator eingepreßt, dass in jeder Halbschwingung eine Längenänderung Δs des Aktuators in der gewünschten Richtung auftritt.

Das Verfahren zur Bereitstellung der Energie kapazitiver Aktuatoren ist auch dadurch gekennzeichnet, dass der höherfrequente Wechselstrom i durch eine elektronische Stelleinrichtung 4 nach Maßgabe des Unterschiedes $u_S - u_A$ zwischen dem Sollwert u_S der Aktuatorspannung und der aktuellen Aktuatorspannung u_A , getrennt nach positiven und negativen Halbschwingungen oder Abschnitten von diesen Halbschwingungen,

stets in derjenigen Richtung in den Aktuator eingeprägt wird, bei der der Betrag des Spannungsunterschiedes $u_S - u_A$ abnimmt.

Das Verfahren zum Bereitstellen der Energie kapazitiver Aktuatoren ist außerdem
5 dadurch gekennzeichnet, dass der höherfrequente Wechselstrom i durch eine elektronische Stelleinrichtung 4 nach Maßgabe des Unterschiedes zwischen einem Sollwert der Aktuatorlänge und dem aktuellen Istwert der Aktuatorlänge getrennt nach positiven und negativen Halbschwingungen oder Abschnitten von diesen Halbschwingungen, in derjenigen Richtung in den Aktuator eingeprägt wird, bei der der
10 Betrag des Unterschiedes zwischen dem Sollwert der Aktuatorlänge und dem Istwert der Aktuatorlänge abnimmt.

Das Verfahren zum Bereitstellen der Energie kapazitiver Aktuatoren ist weiterhin
dadurch gekennzeichnet, dass der Sollwert u_S der Aktuatorspannung aus der
15 Abweichung zwischen einem Sollwert der Aktuatorlänge und dem aktuellen Istwert der Aktuatorlänge gebildet wird.

Das Verfahren zum Bereitstellen der Energie kapazitiver Aktuatoren ist auch dadurch
gekennzeichnet, dass der aktuelle Istwert der Aktuatorlänge durch Erfassen eines
20 Weges oder eines Winkels an der mechanischen Übersetzung 5c des Aktuators ermittelt wird.

Das Verfahren zum Bereitstellen der Energie kapazitiver Aktuatoren ist gekennzeichnet
25 durch folgende Verfahrensschritte: das getrennte Einprägen der Halbschwingungen mit unterschiedlicher Polarität oder entsprechender Halbschwingungsabschnitte des höherfrequenten Wechselstromes i erfolgt innerhalb jeder Halbschwingung in drei aufeinanderfolgenden Phasen der Betriebszustände „Wechselrichterbetrieb“, „Leerlauf“ und „Gleichrichterbetrieb“, wobei der Übergang zwischen den Phasen der Betriebszustände durch Abschalten eines Halbleiterschalters erfolgt und wobei die
30 Dauer bzw. das Maß der Winkelbereiche der einzelnen Phasen die Richtung und Größe des mittleren Ladungs- und Energietransports bestimmt.

Schließlich ist das Verfahren zum Bereitstellen der Energie kapazitiver Aktuatoren
dadurch

gekennzeichnet, dass die Dauer bzw. das Maß der Winkelbereiche der Phasen der Betriebszustände durch Verschieben der Leitbereiche eines in Reihe liegenden Schalterpaares S1, S3 oder S2, S4 gegenüber den Leitbereichen der Schalterpaare in der Grundstellung S10, S30 oder S20, S40 eingestellt wird, und dass die Leitbereichssignale der Grundstellung S10, S30 und S20, S40 der in Reihe liegenden Schalterpaare S1, S3 und S2, S4 innerhalb eines zum eingepprägten höherfrequenten Strom i synchronisierten Schaltrasters SR eine konstante Phasenlage haben.

Die Anordnung zur Durchführung des Verfahrens umfasst die Merkmale, dass sie einen Frequenzgenerator 2 aufweist, bestehend aus einem Wechselrichter mit abschaltbaren Halbleiterschaltern T1-T4 und einem nachgeschalteten Reihenschwingkreis L_G , C_G , dessen Resonanzfrequenz f_G mit der Wechselrichterfrequenz f_W übereinstimmt, und eine Aktuatorstelleinrichtung 4 aufweist, die wenigstens eine Schaltung 4a, 4b, 4c mit abschaltbaren Leistungshalbleitern in Matrixanordnung enthält, welche den an dem Reihenschwingkreiskondensator C_G des Frequenzgenerators 2 abgenommenen Strom i_G , i getrennt nach positiven und negativen Halbschwingungen oder Abschnitten aus diesen Halbschwingungen in den Aktuator 5, 5a in derjenigen Richtung einpräg, dass die in dem Aktuator gespeicherte Ladung und Energie mit jeder Halbschwingung des Stromes entsprechend der gewünschten Längenänderung (Δs) des Aktuators zu oder abnimmt.

Die Anordnung zur Durchführung des Verfahrens ist gekennzeichnet durch die Merkmale, dass einem Frequenzgenerator 2, bestehend aus einem Wechselrichter mit abschaltbaren Halbleiterschaltern T1-T4 und einem nachgeschalteten Reihenschwingkreis L_G , C_G , dessen Resonanzfrequenz f_G mit der Wechselrichterfrequenz f_W übereinstimmt, einer Aktuatorstelleinrichtung 4, die wenigstens eine Schaltung 4a, 4b, 4c mit abschaltbaren Leistungshalbleitern in Matrixanordnung enthält, welche den an dem Reihenschwingkreiskondensator C_G des Frequenzgenerators 2 abgenommenen Strom i_G , i getrennt nach positiven und negativen Halbschwingungen oder Abschnitten aus diesen Halbschwingungen in den Aktuator 5, 5a in derjenigen Richtung einpräg, dass die in dem Aktuator gespeicherte Ladung und Energie mit jeder Halbschwingung des Stromes entsprechend der gewünschten Längenänderung (Δs) des Aktuators zu oder abnimmt.

Die Anordnung zur Durchführung des Verfahrens ist gekennzeichnet durch die Merkmale, dass der Reihenschwingkreiskondensator C_G des Frequenzgenerators 2 an die Primärwicklung 3a eines eine Trennstelle 3c überbrückenden induktiven Übertragers 3 angeschlossen ist, und dass die auf dem bewegbaren Teil befindliche Sekundärwicklung 3b des Übertragers an die Schaltungen 4a, 4b, 4c mit abschaltbaren Leistungshalbleitern in Matrixanordnung der Aktuatorstelleinrichtung 4 angeschlossen ist.

Anordnung zur Durchführung des Verfahrens ist auch dadurch gekennzeichnet, dass die Aktuatorstelleinrichtung 4 Mittel zur Regelung 4_R und zur Steuerung 4_{ST} des Einprägens von positiven und negativen Halbschwingungen oder Abschnitten von Halbschwingungen des höherfrequenten Wechselstromes i in den Aktuator 5, 5a aufweist, dass das Mittel zur Regelung 4_R das Mittel zur Steuerung 4_{ST} über ein Signal ϕ in Abhängigkeit von dem Betrag des Unterschiedes $u_S - u'_A$ zwischen dem Sollwert u_S

und dem Istwert u'_A der Aktuatorspannung veranlasst, unterschiedlich große Abschnitte von Halbschwingungen des Stromes i zu bilden, und dass das Mittel zur Regelung 4_R das Mittel zur Steuerung 4_{ST} über das Signal G/W in Abhängigkeit von dem Vorzeichen des Unterschiedes $u_S - u'_A$ zwischen dem Sollwert u_S und dem Istwert u'_A der Aktuatorspannung veranlasst, die Leistungshalbleiter S_1, S_2, S_3, S_4 in der Weise zu steuern, dass dem Aktuator 5, 5a bei negativem Vorzeichen des Unterschiedes $u_S - u'_A$ von Halbschwingung zu Halbschwingung sukzessive Ladung bzw. Energie entzogen wird und bei positivem Vorzeichen des Unterschiedes $u_S - u'_A$ von Halbschwingung zu Halbschwingung sukzessive Ladung bzw. Energie zugeführt wird.

Die Anordnung zur Durchführung des Verfahrens ist gekennzeichnet durch die Merkmale, dass die Aktuatorstelleinrichtung 4 Mittel zur Regelung 4_R und zur Steuerung 4_{ST} des Einprägens von positiven und negativen Halbschwingungen oder Abschnitten von Halbschwingungen des höherfrequenten Wechselstromes i in den Aktuator 5, 5a aufweist, dass der Aktuator 5, 5a Mittel zur Erfassung des Istwertes der Aktuatorlänge aufweist, dass das Mittel zur Regelung 4_R das Mittel zur Steuerung 4_{ST} über ein Signal ϕ in Abhängigkeit von dem Betrag des Unterschiedes zwischen dem Sollwert und dem Istwert der Aktuatorlänge beeinflusst, unterschiedlich große Abschnitte von Halbschwingungen des Stromes i zu bilden, und dass das Mittel zur

Regelung 4_R das Mittel zur Steuerung 4_{ST} über das Signal G/W in Abhängigkeit von dem Vorzeichen des Unterschiedes zwischen dem Sollwert und dem Istwert der Aktuatorlänge die Leistungshalbleiter S1, S2, S3, S4 in der Weise zu steuern veranlasst, dass dem Aktuator 5, 5a bei negativem Vorzeichen des Unterschiedes von Halbschwingung zu Halbschwingung sukzessive Ladung bzw. Energie entzogen und bei positivem Vorzeichen des Unterschiedes von Halbschwingung zu Halbschwingung sukzessive Ladung bzw. Energie zugeführt wird.

Die Anordnung zur Durchführung des Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass der Aktuator 5, 5a Mittel zur Erfassung des Istwertes der Aktuatorlänge aufweist und dass die Aktuatorstalleinrichtung Mittel zur Bildung eines Sollwertes u_s der Aktuatorspannung aus der Abweichung zwischen einem Sollwert der Aktuatorlänge und dem aktuellen Istwert der Aktuatorlänge aufweist

Die Anordnung zur Durchführung des Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass der Aktuator 5 Mittel zum Erfassen und Umwandeln eines Weges oder eines Winkels der mechanischen Übersetzung 5c in den Istwert der Aktuatorlänge aufweist.

Die Anordnung zur Durchführung des Verfahrens ist auch dadurch gekennzeichnet, dass dem Mittel zur Steuerung 4_{ST} des Einprägens von Halbschwingungen oder Abschnitten von Halbschwingungen des Wechselstromes i in den Aktuator Signale SR eines zum Wechselstrom i synchronisierten Schaltrasters zugeführt werden, dass das Mittel zur Steuerung 4_{ST} Logikmittel umfasst, welche aus Signalen SR des Schaltrasters Leitbereichssignale S10, S30 und S20, S40 der Grundstellung der in Reihe liegenden Halbleiterschalterpaare S1, S3 und S2, S4 bilden, dass das Mittel zur Steuerung 4_{ST} Mittel zur voreilenden Verschiebung der Leitbereiche des Schalterpaares S2, S4 gegenüber der Grundstellung S20, S40 im Gleichrichterbetrieb umfasst und auch Mittel zur nacheilenden Verschiebung der Leitbereiche des Schalterpaares S1, S3 gegenüber der Grundstellung S10, S30 im Wechselrichterbetrieb umfasst, und dass dem Mittel zur Steuerung 4_{ST} von dem Mittel zur Regelung 4_R ein Signal G/W zur Einstellung der Richtung der Verschiebung und ein Signal ϕ zur Einstellung des Maßes der Verschiebung zugeführt wird.

- Die Anordnung zur Durchführung des Verfahrens ist gekennzeichnet durch die Merkmale, dass zur Bildung einer Ausgangsspannung u'_A, u_A der Aktuatorstelleinrichtung 4 mit nur einer Polarität der Ausgangsleiter A, B' der Schaltung 4a, 4b unipolare abschaltbare Leistungshalbleiter S1, S2, S3, S4 in
- 5 Matrixanordnung enthält, dass die unipolaren abschaltbaren Leistungshalbleiter auf die Polarität der Ausgangsspannung bezogen in der Richtung in die Matrix eingesetzt sind, in der sie die Ausgangsspannung u'_A, u_A als Sperrspannung aufnehmen und den Strom I_A von dem positiven Ausgangsleiter zu einem Wechselstromeingang abschalten.
- 10 Die Anordnung zur Durchführung des Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass zur Bildung einer Ausgangsspannung u'_A, u_A der Aktuatorstelleinrichtung 4 mit wechselnder Polarität der Ausgangsleiter A, B' die Schaltung 4c bipolare abschaltbare Leistungshalbleiter in Matrixanordnung enthält, die wahlweise positive oder negative Spannungen sperren und Ströme in beiden Stromflussrichtungen abschalten.
- 15 Die Anordnung zur Durchführung des Verfahrens ist gekennzeichnet durch die Merkmale, dass jeder bipolare Leistungshalbleiter aus zwei gegensinnig in Reihe geschalteten unipolaren Leistungshalbleitern besteht, wobei bei positiver Ausgangsspannung u'_A, u_A das Mittel zur Steuerung 4_{ST} die steuerbaren
- 20 Leistungshalbleiter (S1P, S2P, S3P, S4P), die eine positive Ausgangsspannung sperren, in der erfindungsgemäßen Weise im Gleich- und Wechselrichterbetrieb steuert und die für negative Ausgangsspannungen vorgesehenen Leistungshalbleiter S1N, S2N, S3N, S4N, solange positive Ausgangsspannung vorliegt, in den leitenden Zustand steuert, und wobei bei negativer Ausgangsspannung u'_A, u_A das Mittel zur Steuerung 4_{ST} die
- 25 steuerbaren Leistungshalbleiter S1N, S2N, S3N, S4N, die negative Ausgangsspannung sperren, in der erfindungsgemäßen Weise im Gleich- und Wechselrichterbetrieb steuert und die für positive Ausgangsspannung vorgesehenen Leistungshalbleiter S1P, S2P, S3P, S4P, solange negative Ausgangsspannung vorliegt, in den leitenden Zustand steuert.
- 30 Die Anordnung zur Durchführung des Verfahrens ist gekennzeichnet durch die Merkmale, dass der Aktuator 5 zwei elektrisch in Reihe geschaltete Stapel 5a, 5b aus piezoelektrischem Material enthält, dass an den Mittelanschluss B und einen Außenleiteranschluss A der in Reihe geschalteten Stapel 5a, 5b eine erfindungsgemäße

Aktuatorstelleinrichtung 4 bzw. 4.1, Fig. 7 angeschlossen ist und an die Außenleiteranschlüsse A, C der in Reihe geschalteten Stapel 5a, 5b eine Gleichspannung u_{AV} als Vorspannung gelegt ist, die von einer Gleichspannungsquelle gebildet wird, die mindestens die Hälfte $i_A/2$ des an dem Mittelanschluss von der Aktuatorstelleinrichtung 4 eingepprägten Stromes i_A liefert und aufnimmt und dabei den Wert der Gleichspannung u_{AV} konstant hält.

Die Anordnung zur Durchführung des Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass die Gleichvorspannung u_{AV} von einem nach dem Stand der Technik ausgebildeten Netzgerät geliefert wird, dessen Ausgangskapazität so bemessen ist, dass die durch die Aktuatorstelleinrichtung 4 verursachten Ströme $i_A/2$ wechselnder Richtung keine nennenswerte Änderung der Gleichvorspannung u_{AV} verursachen.

Die Anordnung zur Durchführung des Verfahrens ist auch dadurch gekennzeichnet, dass die Gleichvorspannung u_{AV} an den Außenleiteranschlüssen A, C der in Reihe geschalteten Stapel 5a, 5b von einer erfindungsgemäßen Aktuatorstelleinrichtung 4.2, Fig. 7 gebildet wird, der ein konstanter Vorspannungssollwert VSS2 zugeführt ist.

Die Anordnung zur Durchführung des Verfahrens ist gekennzeichnet durch die Merkmale, dass mindesten zwei in ihren mechanischen Bewegungen unabhängige Aktuatoren 5.1, 5.3 mit je zwei in Reihe geschalteten Stapeln aus piezoelektrischem Material mit ihren Außenleitern A1, A3 und C1, C3 an eine gemeinsame Aktuatorstelleinrichtung 4.2 angeschlossen sind, welche die Vorspannung u_{AV2} zwischen den Außenleitern A1, C1 und A3, C3 unabhängig von den über die Aktuatoren fließenden Strömen i_{A1} , i_{A3} auf einem konstanten Wert hält, dass in jeden der Aktuatoren 5.1, 5.3 mit zwei in Reihe geschalteten Stapeln aus piezoelektrischem Material je eine Aktuatorstelleinrichtung 4.1, 4.3 über die Mittenanschlüsse B1, B3 und die gemeinsamen Außenleiteranschlüsse A1, A3 der in Reihe geschalteten Stapeln Ströme i_{A1} , i_{A3} zur Einstellung der voneinander unabhängigen Aktuatorumladespannungen u_{AU1} , u_{AU3} und der zugehörigen unabhängigen Bewegungen einprägen, dass jeder Aktuatorstelleinrichtung 4.1, 4.2, 4.3,... der eingepprägte höherfrequente Strom i' über die Sekundärwicklung b von Eingangstransformatoren 7.1, 7.2, 7.3,... zugeführt wird, deren Primärwicklungen a in Reihe geschaltet sind und einen allen Aktuatorstelleinrichtungen gemeinsamen höherfrequenten Stromzwischenkreis

HFZK bilden, und dass in den höherfrequenten Stromzwischenkreis der Frequenzgenerator 2 seinen Ausgangsstrom i_G als Zwischenkreisstrom i einprägt.

Die Anordnung ist schließlich dadurch gekennzeichnet, dass der Frequenzgenerator 2 seinen Ausgangsstrom i_G über einen eine Trennstelle 3 überbrückenden Transformator 3 als Zwischenkreisstrom i in den Stromzwischenkreis HFZK einprägt.

Der besondere Vorteil der erfindungsgemäßen berührungslosen Übertragung von Energie und/ oder Kontrollfunktionen in einem System, das mindestens ein stationäres und ein bewegbares Teil umfasst, zwischen denen Energie zu übertragen ist, liegt darin dass im bewegbaren Teil keinerlei erschütterungsempfindliche Bauteile, wie beispielsweise Elektrolytkondensatoren, verwendet werden müssen und gleichzeitig wenigstens die gleiche Funktionssicherheit wie bei bisher bekannt gewordenen vergleichbaren Systemen zur Steuerung und Energieübertragung bei kapazitiven Aktuatoren. Grundsätzlich eignet sich die erfindungsgemäße Anordnung und das erfindungsgemäße Verfahren ebenso gut zur Steuerung und Energieversorgung von kapazitiven Aktuatoren über kürzere oder auch größere Entfernungen, insbesondere auch für Systeme, in denen keine Trennstellen zwischen stationären und bewegten Teilen überbrückt werden müssen.

Die Erfindung wird an Hand der in den Figuren 1 bis 7 schematisch vereinfacht dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1: eine schematische Anordnung zur Durchführung des Verfahrens mit einem stationären Frequenzgenerator 2, einem eine Trennstelle überbrückenden induktiven Übertrager 3, einer Aktuatorstelleinrichtung 4 und einem kapazitiven Aktuator 5 mit einem Stapel 5a piezoelektrischen Materials,

Fig. 2: ein beispielhaftes Schaltprinzip für die schematische Anordnung nach Fig. 1,

Fig. 3: Diagramme a) bis e) und Schaltzustände 1 - 6 der Aktuatorstelleinrichtung 4,

Fig. 4: erläutert Schaltprinzip und Wirkungsweise des Leistungskernes 4c einer Aktuatorstelleinrichtung 4 mit bipolarer Ausgangsspannung u'_A ,

5 Fig. 5: ein Ausführungsbeispiel einer Aktuatorstelleinrichtung 4 mit beliebiger Ausgangsspannung,

Fig. 6: eine schematische Anordnung eines Doppelaktuators mit zwei Stapeln 5a, 5b, piezoelektrischen Materials,

10 Fig. 7: ein Ausführungsbeispiel mit 4 Doppelaktuatoren an einer gemeinsamen Energiezufuhr,

Fig. 8: die Integration einer erfindungsgemäßen Energieversorgung im Bereich der Rotorwelle und der Rotorblätter eines Drehflügelflugzeugs,

15 Fig. 9: einen Schnitt durch eine Vorrichtung zur Energieübertragung im Bereich der Rotorwelle.

Die schematische Anordnung der Erfindung in Fig.1 zeigt einen stationären Frequenzgenerator 2, der aus einer Gleichspannungsquelle 1, die eine Batterie oder ein auf Gleichspannung geladener Kondensator sein kann, einen Wechselstrom i_G höherer Frequenz von beispielsweise 100 kHz generiert, der eine von der Amplitude und der Phasenlage der Gegenspannung u_G unabhängige Amplitude i_G aufweist. Ein derartiger Generator kann je nach der Phasenlage der Gegenspannung Wirk- und Blindleistung abgeben und aufnehmen.

25

Um die Leistung bzw. die Energie über die Trennstelle 3c zu mindestens einem Aktuator 5 auf dem bewegbaren Teilsystem zu transportieren, wird der Wechselstrom i_G der Primärwicklung 3a eines die Trennstelle überbrückenden induktiven Übertragers 3 zugeführt. Auf dem bewegbaren Teilsystem ist die Sekundärwicklung 3b des Übertragers mit einer elektronischen Stelleinrichtung 4, die als Aktuatorstelleinrichtung wirkt und in der Regel einer Stromrichterschaltung entspricht, verbunden. Ist das bewegbare Teilsystem drehbar, so kann der Übertrager 3 ein dem Stand der Technik entsprechender induktiver Drehübertrager sein, dessen Primärteil im Drehpunkt der

30

Bewegung befestigt und dessen Sekundärteil im Drehpunkt drehbar gelagert ist. Die zu überbrückende Trennstelle verläuft in diesem Fall als Luftspalt im Inneren des Drehübertragers. Für lineare Bewegungen stehen ebenfalls Linearübertrager zur Überbrückung einer entlang der Bewegungsstrecke verlaufenden Trennstelle zur

- 5 Verfügung. Der aus der Sekundärwicklung 3b des Übertragers entsprechend dessen Übersetzungsverhältnisses austretende Strom i wird über eine elektronische Aktuatorstelleinrichtung 4, getrennt nach positiven und negativen Halbschwingungen oder Abschnitten aus diesen Halbschwingungen, stets in der Richtung in den kapazitiven Aktuator eingepreßt, in der der Betrag des
- 10 Unterschiedes $u_S - u_A$ eines Spannungssollwertes u_S und der aktuellen Aktuatorspannung u_A von Halbschwingung zu Halbschwingung abnimmt. Ist der Spannungsunterschied $u_S - u_A$ zu Null geworden oder liegt dieser innerhalb eines als Null akzeptierten Toleranzbandes, leitet die Aktuatorstelleinrichtung 4 den Strom i an dem Aktuator 5 über einen Kurzschluss der Zuleitungen zur Aktuatorstelleinrichtung
- 15 vorbei. Dieser Kurzschluss ist bei eingepreßtem Strom i völlig unkritisch.

Der kapazitive Aktuator 5 wandelt die beim Aufbringen einer Ladung $\int i_A dt$ auf einen Stapel 5a piezoelektrischen Materials auftretende Längenänderung Δs über eine mechanische Übersetzung 5c in eine Winkeländerung einer Klappe 6 um.

20

Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht mit dem zur Übertragung über den induktiven

- Übertrager 3 zwingend erforderlichen höherfrequenten Wechselstrom i und mittels der Aktuatorstelleinrichtung 4 den Stapel 5a piezoelektrischen Materials zu laden oder zu
- 25 entladen, ohne dass ein Energiespeicher in Form eines Elektrolytkondensators auf dem bewegten System erforderlich ist.

- Es ist offensichtlich, dass das erfindungsgemäße Verfahren auch dann zum Einstellen der Energie kapazitiver Aktuatoren angewendet werden kann, wenn nicht die Aufgabe
- 30 besteht, eine Trennstelle mit Hilfe eines induktiven Übertragers zu überbrücken.

Bei Vorhandensein der Trennstelle müssen in der Regel auch die Sollwerte u_S der Aktuatorspannung, die beispielsweise in einem Leitsystem LS als bitserielle Datenworte generiert werden, über die Trennstelle 3c der Aktuatorstelleinrichtung 4 zugeführt

werden. In dem Ausführungsbeispiel der Fig.1 werden diese mittels einer optischen oder ebenfalls induktiven, nach dem Stand der Technik ausgebildeten Datenübertragungseinrichtung DÜ über die Trennstelle übertragen und auf dem bewegbaren Teilsystem mittels eines Datenwandlers DW in die für die
5 Aktuatorstelleinrichtung geeigneten Sollwerte u_s gewandelt.

In Fig 2 sind eine beispielhafte Ausführung des erfindungsgemäßen Frequenzgenerators 2 und der Aktuatorstelleinrichtung 4 dargestellt. Der Frequenzgenerator 2 ist ein Wechselrichter und besteht aus einer Brückenschaltung
10 abschaltbarer Halbleiterleistungsschalter T1-T4, beispielsweise MOS-Feldeffekt-Transistoren oder IGBTs, mit einem Reihenschwingkreis L_G , C_G in der Brückendiagonalen und einer an den Kondensator C_G über den Übertrager 3 angekoppelten Last. Bei Übereinstimmung der Wechselrichterfrequenz f_w , die ein in der Wechselrichtersteuerung 2a enthaltener Oszillator erzeugt, mit der Resonanzfrequenz
15 des Reihenschwingkreises

$$f_G = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_G C_G}}$$

wird in den an den Kondensator angeschlossenen Übertrager 3 ein von der
20 Gegenspannung u_G und damit von der angeschlossenen Last unabhängiger Strom i_G mit der konstanten Amplitude

$$\hat{i}_G = \hat{u}_{w1} \cdot \sqrt{\frac{C_G}{L_G}}$$

eingepägt. In dieser Gleichung ist \hat{u}_{w1} die Grundswingungsamplitude der
25 Wechselrichterspannung u_w , die bei schwankender Eingangsgleichspannung U_B durch die in der Wechselrichtersteuerung 2a enthaltene Pulsweitenmodulation auf einem konstanten Wert gehalten wird. Die Ausgangsstromamplitude \hat{i}_G des Frequenzgenerators 2 ist sowohl von der Höhe der Gegenspannung u_G als auch von deren Phasenlage zum Strom i_G unabhängig. Der Frequenzgenerator 2 kann daher bei

konstantem Strom \hat{i}_G nicht nur Wirk- und Blindleistung über den Übertrager 3 an den bewegbaren Sekundärteil liefern, sondern auch von diesem aufnehmen und die aufgenommene Wirkleistung der Gleichspannungsquelle U_B zuführen.

- 5 Die Brückenschaltung der Halbleiterleistungsschalter T1 – T4 kann, wie aus der allgemeinen Lehre der Stromrichtertechnik bekannt ist, durch funktionsgleiche Halbbrückenschaltungen mit kapazitivem Eingangsspannungsteiler oder Transformator-Mittelpunktschaltungen ersetzt werden.
- 10 Die Höhe der Gegenspannung u_G und deren Phasenlage und somit die Richtung des Energieflusses werden durch die an die Sekundärwicklung 3b des Übertragers 3 angeschlossene Aktuatorstelleinrichtung 4 bestimmt. Diese enthält als Stelleinrichtung 4a ebenfalls eine Brückenschaltung von Halbleiterleistungsschaltern S1-S4, denen noch Beschaltungskondensatoren C_B parallelgeschaltet sind, auf deren Funktion weiter unten
- 15 eingegangen wird. Am Ausgang der Brückenschaltung zum Aktuator 5 hin liegt ein Filter C_F, L_F , und in die Zuleitung des höherfrequenten Wechselstromes i zur Brückenschaltung ist ein Filter C_L, L_L geschaltet.

- Das Filter C_F, L_F dient der Begrenzung der hochfrequenten Welligkeit des Stromes i_A zum Aktuator 5. Da die Aktuatorspannung u_A über die Stelleinrichtung 4 nur mit einer
- 20 Frequenz von z. B. maximal 500 Hz verstellt wird, die Frequenz der Stromwelligkeit von i_A aber den doppelten Wert der Frequenz f_w , also beispielsweise 200 kHz aufweist, ist das Filter so ausgelegt, daß zwischen der niederfrequenten Aktuatorspannung u_A und dem niederfrequenten Spannungsanteil von u'_A an dem Filterkondensator C_F kein
- 25 nennenswerter Unterschied besteht. Der Spannungsunterschied $u'_A - u_A$, der an der Filterinduktivität L_F auftritt, ist die hochfrequente Spannungswelligkeit von beispielsweise 200 kHz.

- Das als Reihenschwingkreis ausgebildete und auf die Frequenz f_w des
- 30 Frequenzgenerators 2 bzw. des Stromes i abgestimmte Filter C_L, L_L ist ein Saugkreis, der für den Strom i keinen Widerstand darstellt. Die Induktivität L_L dieses Filters nimmt die beim Schalten der Leistungsschalter S1-S4 sprunghaft auftretenden Spannungsunterschiede zwischen der von dem Kondensator C_G auf die sekundäre

Übertragerwicklung 3b übertragenen Spannung u'_G und der niederfrequenten Ausgangsspannung $u'_A \approx u_A$ der Aktuatorstelleinrichtung 4 auf.

- Um die Aktuatorspannung u_A bzw. u'_A , die ein Maß für die in dem piezoelektrischen Material 5a gespeicherte Ladung $\int i_A dt$ und damit auch der Längenänderung Δs ist, den zeitlich veränderlichen Sollwerten u_s nachzuführen, ist eine Regelung 4_R vorhanden, deren Ausgangssignale ϕ und G/W die Steuerung 4_{ST} der Aktuatorstelleinrichtung in der Weise beeinflussen, dass der der Aktuatorstelleinrichtung zugeführte Strom i getrennt nach positiven und negativen Halbschwingungen oder Abschnitten aus diesen Halbschwingungen in der Richtung in den kapazitiven Aktuator eingeprägt wird, dass der Betrag des Unterschiedes $u_s - u_A$ abnimmt. Ist dieser Unterschied positiv, d.h. $u_s > u_A$, muss dem Aktuator weitere Ladung zugeführt werden. Das ist identisch mit einem Energiefluss von der höherfrequenten Wechselstromseite zu der nur niederfrequent veränderlichen Gleichspannungsseite mit den Spannungen u'_A bzw. u_A . Zu diesem Zweck wird die Steuerung 4_{ST} über das Signal G/W veranlasst, die Brückenschaltung S1-S4 als Gleichrichter zu steuern. Das Signal ϕ ist ein Maß für die Größe der Abweichung $u_s - u_A$ und bestimmt, wie an Hand der Fig. 3 noch ausführlicher erläutert wird, der Größe des Winkels der Halbschwingungsabschnitte.
- Bei negativer Abweichung $u_s - u_A$, d.h. $u_s < u_A$, wird dem Aktuator Ladung bzw. Energie entzogen und über die Aktuatorstelleinrichtung 4 in den von dem höherfrequenten Strom i durchflossenen Energieübertragungskreis eingespeist. Die Steuerung 4_{ST} steuert nun, veranlasst durch das Signal G/W , die Brückenschaltung S1-S4 als Wechselrichter, wobei das Signal ϕ wiederum entsprechend der Größe der Abweichung $u_s - u_A$ die Größe des Winkels der Halbschwingungsabschnitte bestimmt.

Die Bildung der Halbschwingungsabschnitte des Stromes i erfolgt durch Ein- und Ausschalten der Halbleiterschalter S1-S4 über die Steuerung 4_{ST} in feinen Rasterschritten synchron zum Schwingungsverlauf. Zu diesem Zweck wird mittels des Stromwandlers SW und der Schaltkreise 4_{S1}, 4_{S2} und 4_{S3} ein zu der Phasenlage des Stromes i synchrones Schaltraster SR erzeugt. In diesem Schaltraster werden die Halbleiterschalter S1 - S4 sowohl im Gleichrichter- als auch im Wechselrichterbetrieb nur in solchen Zeit- bzw. Phasenwinkelbereichen eingeschaltet, in denen der Strom i

bereits über die zu jedem Schalter parallelliegende Diode fließt. Beim Einschalten der Halbleiterschalter S1-S4 wird daher Einschaltverlustleistung vermieden.

5 Zur Bildung des Schaltrasters SR wird das Stromsignal eines Stromwandlers SW, der den höherfrequenten Strom i erfaßt, über eine Komparatorstufe 4_{S1} einem ersten Phaseneingang E1 eines Phase-Lock-Loop-Schaltkreises 4_{S2} zugeführt. Dem zweiten Phaseneingang E2 wird ein mittels eines N-stufigen Zählers 4_{S3} aus dem Ausgangstakt f_T des PLL-Schaltkreises um den Faktor 2^N untersetztes Signal f_{TU} zugeführt. Der PLL-Schaltkreis 4_{S2} stellt die Frequenz seines Ausgangstaktes f_T so ein, dass die Frequenz- und Phasenwinkelabweichung zwischen dem Stromsignal am Eingang E1 mit der Frequenz f_w und dem unteretzten Signal mit der Frequenz f_{TU} am Eingang E2 Null wird. Die N-Ausgangssignale SR des N-stufigen Zählers bilden dann das mit den Nulldurchgängen des Wechselstromes i synchronisierte Schaltraster SR. In dem Beispiel der Fig. 2 beträgt $N=6$. Bei einer Frequenz f_w des Stromes i von 100 kHz hat dann das Schaltraster, in dem die Halbleiterschalter S1-S4 einmal pro 100-kHz-Periode ein- und

10
15

$$\Delta t = \frac{1}{2^6 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}} = 156 \text{ ns.}$$

20 In Fig. 3 erläutern die Diagramme a) bis e) und die Schaltzustände 1 bis 6 das Einstellen des Aktuatorstromes i_A , d. h. das Bilden der Halbschwingungsabschnitte aus dem Strom i , für den Gleichrichter- und für den Wechselrichterbetrieb, wobei Schaltverluste beim Schalten der Halbleiterschalter S1-S4 vermieden werden.

25 Diagramm 3a) zeigt den Verlauf der Spannung u am wechselstromseitigen Eingang der Brückenschaltung S1-S4 in Zuordnung zu dem eingepprägten Strom i . Diagramm 3b) zeigt die zugehörige Bildung der Stromabschnitte aus den Halbschwingungen des Stromes i . Spannungs- und Stromabschnitte des Wechselrichterbetriebes sind durch zusätzliche Punktierung gekennzeichnet. Die Ziffern im Spannungsdiagramm a) kennzeichnen Zeitbereiche, die den Schaltzuständen 1 bis 6 im rechten Teil der Fig. 3 entsprechen.

30

Diagramm c) kennzeichnet die Leitbereiche der Dioden, die in die Schalter S1-S4 integriert sind.

Die Diagramme d) und e) geben die in dem synchronisierten Schaltraster SR liegenden
5 möglichen Leitbereiche der steuerbaren Halbleiterschalter S1-S4 an und zwar Diagramm
d) für den Gleichrichterbetrieb und Diagramm e) für den Wechselrichterbetrieb. Die
umrandeten Leitbereiche kennzeichnen den Winkel- oder Zeitbereich, in dem die
zugeordneten Schalter S1-S4 in den leitenden Zustand gesteuert sind. Für den
Gleichrichterbetrieb und für den Wechselrichterbetrieb sind jeweils die Leitbereiche für
10 drei Einstellungen des Aktuatorstromes, nämlich minimaler, mittlerer und maximaler
Strom dargestellt. Zwischen den Leitbereichen der Halbleiterschalter S1 und S3, bzw.
S2 und S4, die bezüglich der Aktuatorspannung u_A in Reihe geschaltet sind, befindet
sich ein Lückenbereich $\Delta\phi_L$, in dem die in Reihe liegenden Schalterpaare stets
gleichzeitig sperren und die zu den Schaltern parallelgeschalteten
15 Beschaltungskondensatoren C_B , wie weiter unten näher erläutert wird, umgeladen
werden. Zur Einstellung des zu übertragenden Aktuatorstromes behält in jedem
Betriebszustand ein in Reihe liegendes Schalterpaar S1 und S3 oder S2 und S4 die
Phasenlage seiner Leitbereiche zu dem eingepprägten Strom i bei, während die
Leitbereiche des jeweils anderen Schalterpaares zwischen der Minimalstellung SX_{MIN} ,
20 in der der minimale Strom übertragen wird, und der Maximalstellung SX_{MAX} mit
maximaler Stromübertragung in Rasterschritten Δt verschoben werden.

Bei der erfindungsgemäßen Aktuatorstelleinrichtung 4 haben die Leitbereiche in allen
Betriebszuständen eine solche Phasenlage, dass der eingepprägte Strom i bei seinem
25 Nulldurchgang entweder von einer Diode auf den bereits eingeschalteten
parallelliegenden Schalter übergeht oder nach Umladen der Beschaltungskondensatoren
 C_B über die Diode des in Reihe liegenden Schalters weiterfließt. Dadurch sind
Einschaltverluste der steuerbaren Halbleiterschalter vermieden.

30 Am Ende eines Leitbereiches wird der leitende Schalter abgeschaltet, der Strom i lädt
dann
die parallelliegenden Beschaltungskondensatoren C_B um und fließt danach ebenfalls
über die Diode des in Reihe geschalteten Schalters weiter. Das Abschalten muss bei
einem Winkel $\Delta\phi_A$ soweit vor dem nächsten Stromnulldurchgang erfolgen, dass der

Strom i ausreicht, in dem auf das Abschalten folgenden Lückenbereich $\Delta\phi_L$ die zu den Schaltern parallelliegenden Beschaltungskondensatoren C_B um den Betrag der Aktuatorspannung u_A umzuladen.

- 5 Beim Übergang des Stromes von einer Diode auf den parallelliegenden steuerbaren Schalter tritt außer der niedrigen Durchlassspannung keine zusätzliche Spannung auf. Auch beim Abschalten eines Schalters, wenn der Strom von diesem auf die parallelliegenden Kondensatoren übergeht, ist die Spannung an dem Schalter zunächst Null und steigt dann, nachdem der Schalter sperrt, mit einer durch den Kapazitätswert
10 der parallelliegenden Kondensatoren gegebenen Steilheit

$$\frac{du}{dt} = \frac{i}{2C_B}$$

- an. Die Schaltverluste der steuerbaren Schalter sind bei diesen Schaltvorgängen nahezu
15 Null. Dieser Stromübergang ist, wie an Hand der Diagramme und Schaltzustände der Fig. 3 näher gezeigt wird, im Gleich- und Wechselrichterbetrieb identisch.

- In dem Zustand 1 fließt der eingeprägte Strom i im Kurzschluss über die eingeschalteten Schalter S1 und S2. Dem durch eine Gleichspannungsquelle mit der Spannung U_A
20 vereinfacht dargestellten Aktuator wird dabei kein Strom zugeführt. Der Zustand 2 beginnt mit dem Öffnen des Schalters S2 am Ende des Leitbereiches von S2 im Diagramm d). Der Strom i fließt nun im Zustand 2 über die zu den Schaltern S2 und S4 parallelliegenden Beschaltungskondensatoren. Wegen der Gleichheit der Kondensatoren fließt über jeden Kondensator der Strom $i/2$ und nur der Strom des zu S4 parallel
25 liegenden Kondensators fließt über die Gleichspannungsquelle U_A . Der Umladezustand 2 ist beendet und geht in den Zustand 3 über, wenn der zu S2 parallel liegende Kondensator C_B auf die Spannung U_A aufgeladen und der zu S4 parallel liegende Kondensator C_B völlig entladen ist. Im Zustand 3 fließt der Strom i zunächst über den Schalter S1 und die zu dem Schalter S4 parallelliegende Diode sowie über den Aktuator
30 entgegen der Spannung U_A . Es liegt Gleichrichterbetrieb mit Leistungsfluss von der Wechselstromseite zu der Gleichspannungsseite vor. Nach Ablauf des Lückenbereiches $\Delta\phi_L$ wird der spannungslose Schalter S4 geschlossen.

Diagramm a) zeigt in Zuordnung zum Strom i die zugehörige Spannung u am Eingang der Brückenschaltung und Diagramm b) den entsprechenden Abschnitt aus einer Halbschwingung des Stromes i .

- 5 Es ist aus den Diagrammen a), b) und d) zu ersehen, dass durch eine voreilende Verschiebung der Leitbereiche von S2 und S4 nach links aus der mit S2MIN und S4MIN gekennzeichneten Grundstellung, wie durch Pfeile G angedeutet, die dem Aktuator zugeführten Stromabschnitte vergrößert werden, bis annähernd die gesamte Halbschwingung dem Aktuator zugeführt wird. Beim Zurückverschieben der
- 10 Leitbereiche nach rechts werden die Stromabschnitte bis auf den Winkel $\Delta\phi_A$ reduziert. Der Winkel $\Delta\phi_A$ ist der Winkelabstand der rechten Grenzen der Leitbereiche von S2MIN und S4MIN von dem nachfolgenden Stromnulldurchgang und muss etwas größer sein als der gleichzeitig beginnende Lückenbereich $\Delta\phi_L$, damit die Umladung der zu S2 und S4 parallelliegenden Kondensatoren C_B vor dem Schließen des Schalters S4 und vor dem
- 15 nächsten Nulldurchgang des Stromes i abgeschlossen ist. Das Schließen des Schalters S4 nach dem Umladen der Beschaltungskondensatoren und vor dem Nulldurchgang des Stromes i erfolgt spannungslos, weil in diesem Bereich die zu S4 parallelliegende Diode leitet.
- 20 Im Gleichrichterbetrieb werden, wie die in ihrer Grundstellung verbleibenden Leitbereiche S10 und S30 der Schalter S1 und S3 in Diagramm d) zeigen, mit jedem Nulldurchgang die Schalter S1 bzw. S3 geöffnet. Dabei geht der Zustand 3 nach dem Stromnulldurchgang und nach dem Öffnen des Schalters S1 in den Zustand 5 über, in dem nun der zu Schalter S1 parallel liegende Kondensator auf die Spannung U_A
- 25 aufgeladen und der zu Schalter S3 parallel liegende Kondensator entladen werden. Ist letzterer entladen, übernimmt die parallel liegende Diode den Strom und der Schalter S3 wird nach dem Lückenbereich $\Delta\phi_L$ geschlossen. Der eingeprägte Strom i fließt nun im Bereich 6 im Kurzschluss über den Schalter S3 und die parallel liegende Diode sowie den Schalter S4. Der in der negativen Halbschwingung des Stromes i liegende Bereich 6
- 30 entspricht dem Bereich 1 in der positiven Halbschwingung.

Wie Diagramm e) zeigt, haben die Leitbereiche aller Schalter in der Grundstellung des Gleichrichterbetriebes und in der Grundstellung des Wechselrichterbetriebes die gleiche Phasenlage zum eingepägten Strom i . Die Grundstellung des Wechselrichterbetriebes

ist somit die Grundstellung des Gleichrichterbetriebes. Der Wechselrichterbetrieb wird dadurch realisiert, dass nun die Leitbereiche der Schalter S2 und S4 in ihrer Grundstellung S20 und S40 verbleiben und die Phasenlage der Leitbereiche der Schalter S1 und S3 aus ihrer Grundstellung heraus nach rechts nacheilend verschoben werden.

5 Dadurch bleibt am Ende des Bereiches 3 nach dem Nulldurchgang des Stromes i der Schalter S1 weiter geschlossen. Der Bereich 3 geht unter Beibehaltung der Schalterstellungen mit dem Stromnulldurchgang in Bereich 4 des Wechselrichterbetriebes über. Dabei ändert sich die Energieflussrichtung, der Aktuator wird entladen und die Energie dem Wechselstromkreis zugeführt. Der Übergang von dem Gleichrichterbetrieb zum Wechselrichterbetrieb erfolgt durch Verlängern des Schalterzustandes 3 über den Stromnulldurchgang hinaus, ohne dass in dem durch Punktierung gekennzeichneten Bereich 4 ein zusätzlicher Schaltvorgang erforderlich ist. Je nach der Größe der durch Pfeile W gekennzeichneten Verschiebung der Leitbereiche der Schalter S1 und S3 gegenüber dem Grundzustand $S1_{MIN} = S10$ und $S3_{MIN} = S30$ wird der Entladestrom i_A des Aktuators eingestellt. Beim Abschalten des Schalters S1 15 am Ende des Leitbereiches erfolgt der Übergang zu dem bereits beschriebenen Zustand 5. Bei symmetrischer Lage der Umladezustände 2 und 5 zum Nulldurchgang wird dem Aktuator im Wechselrichterbetrieb in den Bereichen 4 und 5 genau soviel Ladung und Energie entzogen wie ihm in der Halbschwingung zuvor im Gleichrichterbetrieb in den Bereichen 2 und 3 zugeführt wurde, d.h. in dieser Stellung der Leitbereiche ist der 20 Mittelwert des Ladungstransportes und des Energieflusses Null.

Die erfindungsgemäße Aktatorstelleinrichtung 4 hat, wie die Diagramme a) bis e) und die Schaltzustände 1 bis 6 zeigen, in jeder Halbschwingung des eingprägten 25 höherfrequenten Wechselstromes i nacheinander eine Phase des Betriebszustandes „Wechselrichterbetrieb“ mit dem Ladungs- und Energietransport vom Aktuator 5, 5a zur Wechselstromseite, eine Phase des Betriebszustandes „Leerlauf“ mit kurzgeschlossenem Wechselstromeingang und ohne Änderung des Ladungs- und Energiezustandes des Aktuators und eine Phase des Betriebszustandes „Gleichrichterbetrieb“ mit Ladungs- 30 und Energietransport von der Wechselstromseite zum Aktuator 5, 5a. Die Phase des „Wechselrichterbetriebes“ beginnt mit jedem Nulldurchgang des Stromes i automatisch, wenn während der vor dem Stromnulldurchgang liegenden Phase des „Gleichrichterbetriebes“ die zu den leitenden Dioden parallelliegenden steuerbaren Leistungshalbleiter eingeschaltet wurden. Die Phase des „Wechselrichterbetriebes“

kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt innerhalb der aktuellen Halbschwingung durch Abschalten eines der beiden in der „Wechselrichterphase“ leitenden steuerbaren Leistungshalbleiter beendet werden. Die Aktuatorstelleinrichtung geht dann in die „Leerlaufphase“. Durch Abschalten des weiteren in der „Leerlaufphase“ noch leitenden steuerbaren Leistungshalbleiters wird dann die Phase des „Gleichrichterbetriebes“
5 eingestellt. Dies muss mindestens bei einem Winkel $\Delta\varphi_A$ vor dem folgenden Nulldurchgang des Stromes i erfolgen, um die vollständige Umladung der Beschaltungskondensatoren C_B in dem Lückenbereich $\Delta\varphi_L$ zu gewährleisten.

- 10 Der Übergang zwischen den Phasen der Betriebszustände erfolgt durch Abschaltvorgänge, bei denen keine Abschaltverluste auftreten. Die Größe und die Richtung des mittleren Ladungs- und Energietransportes über die erfindungsgemäße Aktuatorstelleinrichtung wird durch die Dauer bzw. die Größe der Winkelbereiche der einzelnen Phasen bestimmt und im Gleichrichterbetrieb über die voreilende
15 Verschiebung „G“ der Schalter S2, S4 gegenüber der Grundstellung $S2_{MIN}=S20$ sowie $S4_{MIN}=S40$ und im Wechselrichterbetrieb über die nacheilende Verschiebung „W“ der Schalter S1, S3 gegenüber der Grundstellung $S1_{MIN}=S10$ sowie $S3_{MIN}=S30$ eingestellt.

- Die Schaltungsanordnung nach den Figuren 1 und 2 ermöglicht nur die Einstellung von
20 Aktuatorspannungen u_A eines Vorzeichens, d. h. die Ausgangsleitung B kann gegenüber der Ausgangsleitung A nur positiv gepolt sein. Für bestimmte Aktuatoren werden jedoch Aktuatorstelleinrichtungen 4 mit positiver und negativer Ausgangsspannung benötigt. Eine erfindungsgemäße Aktuatorstelleinrichtung 4, die diese Forderung erfüllt, ist in Fig. 5 dargestellt. Sie unterscheidet sich von der Aktuatorstelleinrichtung 4 der Fig. 2
25 dadurch, dass in dem Stelleinrichtung 4c an Stelle der Halbleiterschalter S1, S2, S3, S4 der Schaltung 4a, die nur Spannung einer Polarität sperren und Strom einer Richtung ein- und ausschalten können, Halbleiterschalter verwendet werden, die Spannungen beider Polaritäten sperren und Ströme in beiden Richtungen ein- und ausschalten können. Derartige bidirektionale Halbleiterschalter bestehen beispielsweise, wie in Fig.
30 4c und Fig. 5 gezeigt, aus einem Paar gegensinnig in Reihe geschalteter steuerbarer Halbleiterschalter $S1P/S3N$, $S2P/S4N$, $S3P/S1N$, $S4P/S2N$.

Die Wirkungsweise einer Aktuatorstelleinrichtung 4 für bidirektionale Ausgangsspannungen wird an Hand der in Fig. 4 gezeigten Stelleinrichtungen 4a) bis

4c) erläutert. In Fig. 4a) ist noch einmal die Stalleinrichtung für positive Ausgangsspannung u'_A der in Fig. 2 gezeigten Aktuatorstalleinrichtung 4 dargestellt.

Zur Bildung einer negativen Ausgangsspannung u'_A müssen die steuerbaren Halbleiterschalter bezogen auf die Ausgangsleitungen A,B' nach dem in Fig. 4b)

- 5 gezeigten Schema angeordnet sein. Zur Unterscheidung der Halbleiterschalter in beiden Anordnungen haben die Schalter S1-S4 in der Anordnung für positive Ausgangsspannung zusätzlich die Kennung „P“ und in der Anordnung für negative Ausgangsspannung zusätzlich die Kennung „N“ erhalten. Die Ziffern 1-4 kennzeichnen in beiden Anordnungen Halbleiterschalter, die auf den Eingangsstrom i bezogen

- 10 gleichphasig angesteuert werden. Die Schaltung 4c liefert eine positive Ausgangsspannung, wenn die mit „N“ bezeichneten Halbleiterschalter dauernd in den leitenden Zustand geschaltet sind und die mit „P“ bezeichneten Halbleiterschalter in der an Hand der Figuren 2 und 3 beschriebenen Weise angesteuert werden. Beim Bilden einer negativen Ausgangsspannung u'_A bleiben die mit „P“ bezeichneten

- 15 Halbleiterschalter dauernd in den leitenden Zustand gesteuert und die mit „N“ bezeichneten Halbleiterschalter erhalten nun die Steuersignale, die beim Generieren einer positiven Ausgangsspannung den mit „P“ bezeichneten Halbleiterschaltern mit der gleichen Kennziffer zugeführt werden. Die Umschaltung der Steuersignale erfolgt in der Steuerung 4_{ST} der Fig.5 in Abhängigkeit von dem Vorzeichen der Differenz $u_S - u_A$, wobei
20 diese Vorzeicheninformation in der Information ϕ enthalten ist, beim Nulldurchgang der Ausgangsspannung des Aktuatorstellers, d. h. bei $u'_A = 0$.

Piezoelektrische Aktuatoren werden besonders vorteilhaft, wie Fig. 6 zeigt, mit 2 gegenphasig betriebenen Stapeln 5a, 5b aus piezoelektrischem Material ausgerüstet.

- 25 Hierbei sind die beiden Piezostapel 5a und 5b bezüglich einer annähernd konstant gehaltenen Vorspannung u_{AV} in Reihe und bezüglich einer zwischen dem Mittelpunktanschluss B und einem Außenleiteranschluss, beispielsweise A, angelegten Umladespannung u_{AU} parallelgeschaltet. Mit einem derartigen Doppelaktuator werden größere Stellwege $\Delta s_1 + \Delta s_2$ und größere Stellkräfte erreicht als mit einem Aktuator, der
30 nur einen Piezostapel aufweist. Bezüglich der Kapazität sind die beiden Stapel eines Doppelaktuators weitgehend gleich. Beim Einprägen eines Stromes i_A über den Mittelleiter B fließt der Strom je zur Hälfte über die beiden Außenleiter A und C zurück. Dabei wird der obere Piezostapel 5b in Fig. 6 im Richtungssinn der Vorspannung u_{AV}

entladen und der untere Piezostapel 5a im Richtungssinn der Vorspannung u_{AV} weiter aufgeladen, so dass bei dem oberen Stapel die durch die Ladung verursachte Dehnung zurückgeht und auf dem unteren Stapel die Dehnung zunimmt. Die Speisung eines derartigen Doppelaktuator kann beispielsweise durch zwei erfindungsgemäße

5 Aktuatorsteller erfolgen. Werden mehr als zwei Doppelaktuatoren mit gleichen Stellaufgaben angesteuert, so können diese ihre Vorspannung von einem gemeinsamen Aktuatorsteller erhalten.

Da die Vorspannung u_{AV} von Doppelaktuatoren in der Regel konstant ist und nur die

10 Umladespannung u_{AU} zur Steuerung der Bewegung verändert wird, kann die Gleichvorspannung auch von einem nach dem Stand der Technik ausgebildeten Netzgerät erzeugt werden. Dieses Netzgerät muss jedoch in der Lage sein, bei annähernd konstanter Ausgangsspannung u_{AV} den über die zusammengeschalteten

Außenleiter A_x , C_x fließenden Strom $\sum_{x=1}^{x=m} \frac{i_{Ax}}{2}$ von m Doppelaktuatoren zu liefern oder

15 aufzunehmen. Diese Eigenschaft kann beispielsweise dadurch erreicht werden, dass die Ausgangskapazität des Netzgerätes wesentlich größer als die Kapazität der Doppelaktuatoren bemessen wird.

Das Ausführungsbeispiel der Fig. 7 weist 2 Gruppen mit je 2 Doppelaktuatoren auf. Jede

20 der beiden Aktuatorgruppen hat eine eigene Vorspannungsstelleinrichtung 4.2 bzw. 4.5. Diesen werden die im allgemeinen konstanten Vorspannungssollwerte VSS2 und VSS5 zugeführt. Die Aktuatorstelleinrichtungen 4.1 und 4.3 der ersten Gruppe bzw. die Aktuatorstelleinrichtungen 4.4 und 4.6 der zweiten Gruppe stellen durch die Ströme i_{A1} , i_{A3} bzw. die Ströme i_{A4} , i_{A6} die Spannungen u_{AU1} , u_{AU3} bzw. u_{AU4} , u_{AU6} und damit die

25 Ladungen und die Längenänderungen der Doppelaktuatoren nach den Spannungssollwerten u_{S1} , u_{S3} , bzw. u_{S4} , u_{S6} , ein. Diese Spannungssollwerte werden entsprechend den in Fig. 1 und Fig. 7 dargestellten Ausführungsbeispielen in einem Leitsystem LS als bitserielle Datenworte generiert, mittels einer nach dem Stand der Technik ausgebildeten Datenübertragungseinrichtung DÜ über die Trennstelle 3c

30 übertragen und auf dem bewegbaren Teilsystem mittels eines Datenwandlers DW in die für die Aktuatorstelleinrichtungen 4.1, 4.3, bzw. 4.4, 4.6 geeigneten Sollwerte gewandelt und den Stelleinrichtungen zugeführt.

Die Zufuhr des eingepprägten Stromes i' zu jeder der Aktuatorstalleinrichtungen 4.1, 4.3, 4.4, 4.6 und der Vorspannungsstalleinrichtungen 4.2 und 4.5 erfolgt über die Sekundärwicklungen von Eingangstransformatoren 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 und 7.6 deren Primärwicklungen in Reihe geschaltet sind und durch den eingepprägten Strom i aus der Sekundärwicklung 3b des die Trennstelle überbrückenden Transformators 3 gespeist werden. Die Primärwicklung 3a dieses Transformators wird entsprechend der Anordnungen von Fig. 1 und Fig. 2 von dem erfindungsgemäßen Frequenzgenerator 2 mit einem höherfrequenten Wechselstrom i_G konstanter Amplitude gespeist. Ist keine zu überbrückende Trennstelle vorhanden, speist der Frequenzgenerator 2 seinen Ausgangsstrom i_G direkt in die in Reihe geschalteten Primärwicklungen der Eingangstransformatoren 7.1 - 7.6 ein. Durch diese Eingangstransformatoren wird auf ihrer Sekundärseite Potentialfreiheit und Stromanpassung an die Stalleinrichtungen 4.1 - 4.6 und an die Aktuatoren erreicht. Die Ausgänge der potentialfreien Stalleinrichtungen können daher miteinander verbunden sein und ein gemeinsames Massepotential haben. Die Eingangsspannungen u'_1 bis u'_6 der Stalleinrichtungen 4.1 - 4.6 in Fig. 7 entsprechen der Eingangsspannung u'_G der Stalleinrichtung 4 in Fig. 1 und Fig. 2. Die über die Transformatoren 7.1 - 7.6 in Fig. 7 von den Eingängen der Stalleinrichtungen auf die Reihenschaltung der Primärwicklungen übertragenen Spannungen u'_{G1} bis u'_{G6} addieren sich in dem höherfrequenten Zwischenstromkreis HFZK, der aus den in Reihe geschalteten Primärwicklungen der Eingangstransformatoren 7.1 - 7.6 und der Sekundärwicklung 3b des die Trennstelle 3c überbrückenden Übertragers besteht, zu der resultierenden Gesamtspannung u'_G . Dabei gleichen sich entgegengesetzt gerichtete Leistungsflüsse in dem Zwischenstromkreis HFZK durch die Addition entgegengesetzt gerichteter Spannungen aus. Beispielsweise hat ein Leistungsfluss über die Aktuatorstalleinrichtung 4.1 zu dem angeschlossenen Aktuator eine im Sinne der Pfeilrichtung des Eingangsstromes i' positiv zu zählende Eingangsspannung u'_1 zur Folge. Von dem Aktuatorstrom i_{A1} fließt die Hälfte, d. h. der Strom $i_{A1}/2$ über die Vorspannungsstalleinrichtung 4.2 zurück. Die Zuordnung des Stromes $i_{A1}/2$ zu der Vorspannung u_{AV2} ergibt bei der Vorspannungsstalleinrichtung 4.2 einen Leistungsfluss von der Aktuatorseite zu dem höherfrequenten Zwischenstromkreis. Die zugehörige Eingangsspannung u'_2 ist dann der Eingangsspannung u'_1 entgegen gerichtet, wodurch die Gesamtleistung im

Zwischenstromkreis HFZK reduziert wird. Über den Übertrager 3 wird daher nur die resultierende Gesamtleistung aller Aktuatoren übertragen.

Anhand der Figur 8 wird vereinfacht dargestellt, in welcher Weise eine oben
5 beschriebene Vorrichtung und das zugehörige Verfahren unter Verwendung der
Vorrichtung im Bereich der Rotorwelle GR und der Rotorblätter BL eines
Drehflügelflugzeugs, insbesondere eines Hubschraubers zur Anwendung kommt. An
Bord des Hubschrauber fest montiert sind die notwendigen elektronischen Bauteile, wie
beispielsweise die Stromversorgung PS, und der Frequenzgenerator MFG mit der
10 Steuerungselektronik CI, und auch die Verbindung zur Flugsteuerung STC des
Hubschraubers.

An der Rotorwelle GR sind neben diversen Lagern BG verschiedene berührungslose
Kopplungsvorrichtungen CD vorgesehen. Diese können einmal in der Art eines
15 optischen Kopplers DÜ (vgl. Fig. 1) ausgeführt sein, wie dies im Fall der
Signalübertragung STM von der im Leitsystem LS (vgl. Fig. 1) integrierten
Steuerungselektronik CI zum Lichtwellenleiter OW angedeutet ist. Zum anderen sind
berührungslose induktive Signalübertragungen 3 (vgl. Fig. 1) vorgesehen, die
beispielsweise bei der Energieübertragung ETM vom Frequenzgenerator MFG zur
20 Rotorkopfelektronik RHE Verwendung finden.

Bei der Übertragung der Signale des Azimut-Sensors AZS können beide Arten der
Übertragung zur Anwendung kommen. Der Azimut-Sensor AZS dient dazu,
Sollwertgrößen für die verschiedenen Aktuatoren in Abhängigkeit von der momentanen
25 Position des jeweiligen Rotorblattes innerhalb eines Umlaufs zu erzeugen.

Im Bereich der Rotorwelle sind weitere Funktionseinheiten angedeutet, die nur in
mittelbarem Zusammenhang mit der Erfindung stehen, wie die mechanische
Rotorsteuerung RCM und die Rotorkopfsensoren RHS. Von der Rotorkopfelektronik RHE
30 führen weitere elektrische Verbindungen in die Rotorblätter BL zu den Aktuatoren A,
die die Ruderklappen FL bewegen, und zu den Sensoren S, die Lage der Ruderklappen
FL detektieren. Die Ruderklappen stehen hier beispielhaft für verschiedene
Ausführungsformen aerodynamisch wirksamer Einrichtungen an den Rotorblättern. Die
Rotorelektronik RHE enthält somit die oben ausführlich beschriebenen elektronischen

Aktuatorstelleinrichtung 4 (vgl. Fig. 1, 2) und die weiteren zur Ansteuerung und Kontrolle der Aktuatoren A notwendigen elektronischen Schaltungen, wie beispielsweise den Datenwandler DW (vgl. Fig. 1).

- 5 Die Figur 9 zeigt schließlich eine Detaillösung bezüglich der berührungslosen induktiven Energieübertragung ETM, die in der Figur 8 nur schematisch vereinfacht dargestellt ist. Innerhalb einer statischen Rotorwellenlagerung SP ist die als Hohlwelle ausgeführte Rotorwelle RTG drehbar gelagert. Im Bereich der Drehachse der rotierenden Hohlwelle RTG sind der Lichtwellenleiter OW für die optische Datenübertragung und
- 10 koaxial um diesen herum die beiden leitfähigen Metallrohre CMW angeordnet. Beide Leiter führen in Pfeilrichtung nach rechts zu der nicht dargestellten Rotorkopfelektronik RHE.

- Die beiden leitfähigen Metallrohre CMW sind über die Verbindungsleitungen CC mit der
- 15 gemeinsam mit der Rotorwelle rotierenden Wicklung w_2 (entsprechend 3b in Figur 1) elektrisch verbunden. Zusammen mit der statischen Wicklung w_1 (entsprechend 3a in Figur 1) bildet die rotierende Wicklung w_2 den berührungslosen Übertrager (entsprechend 3 in Figur 1). Die Zuleitungen zur stationären Wicklung w_1 sind in der Figur 9 nicht explizit dargestellt.

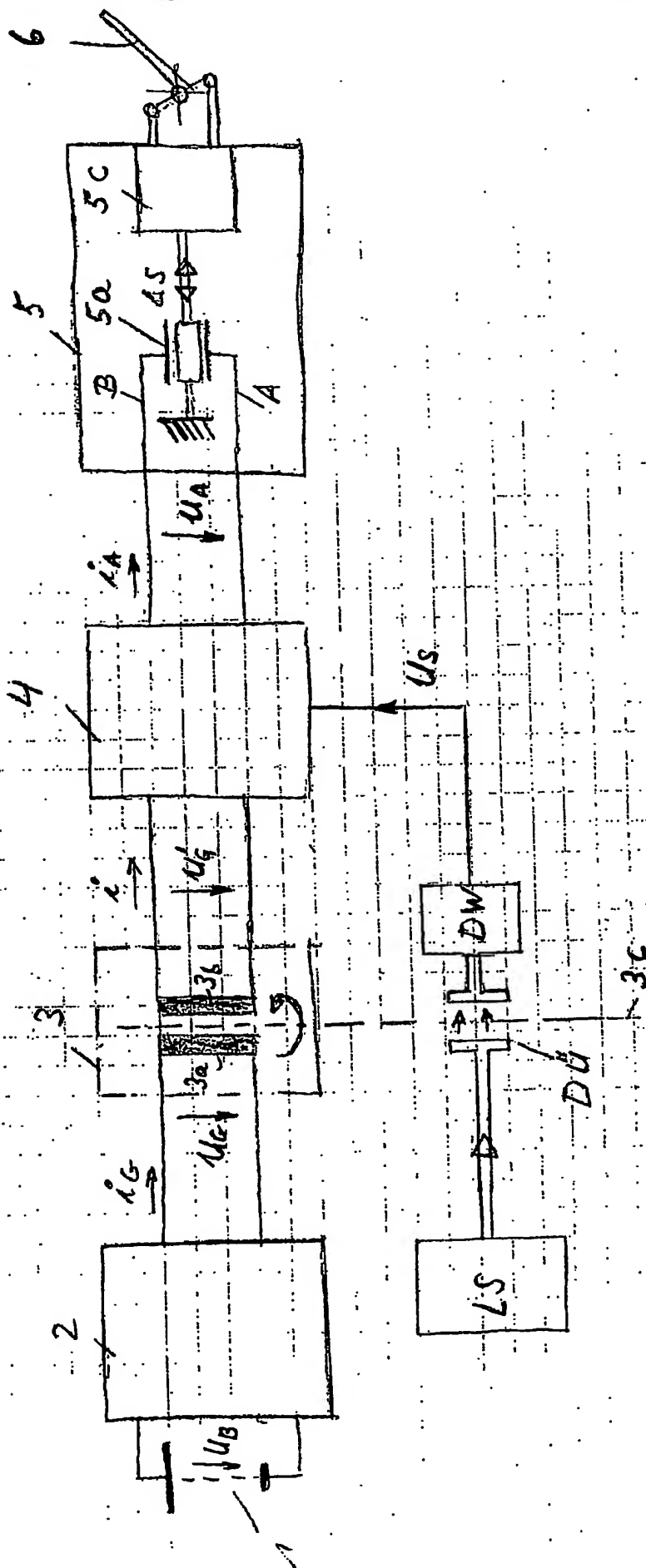


Fig. 1

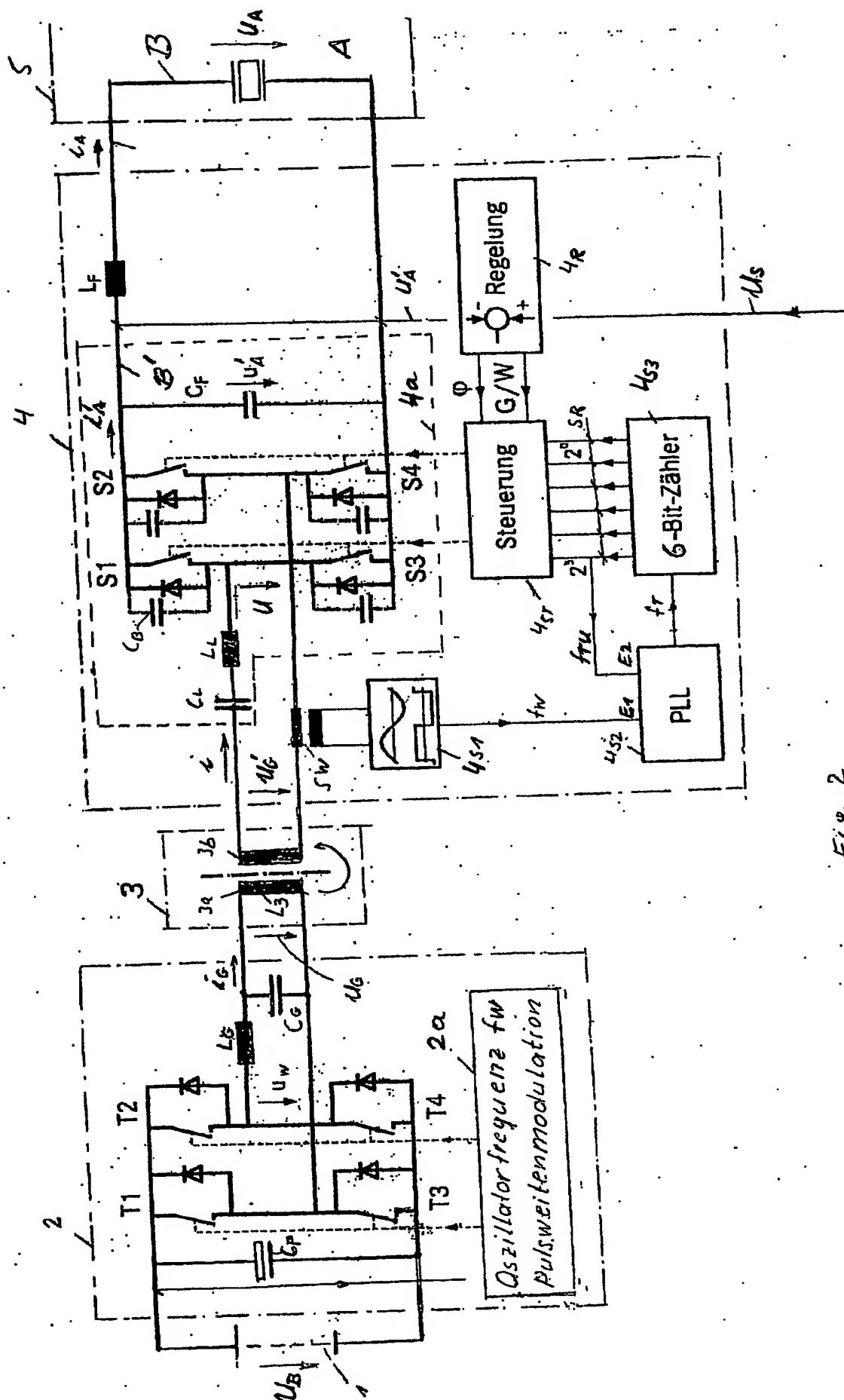


Fig. 2

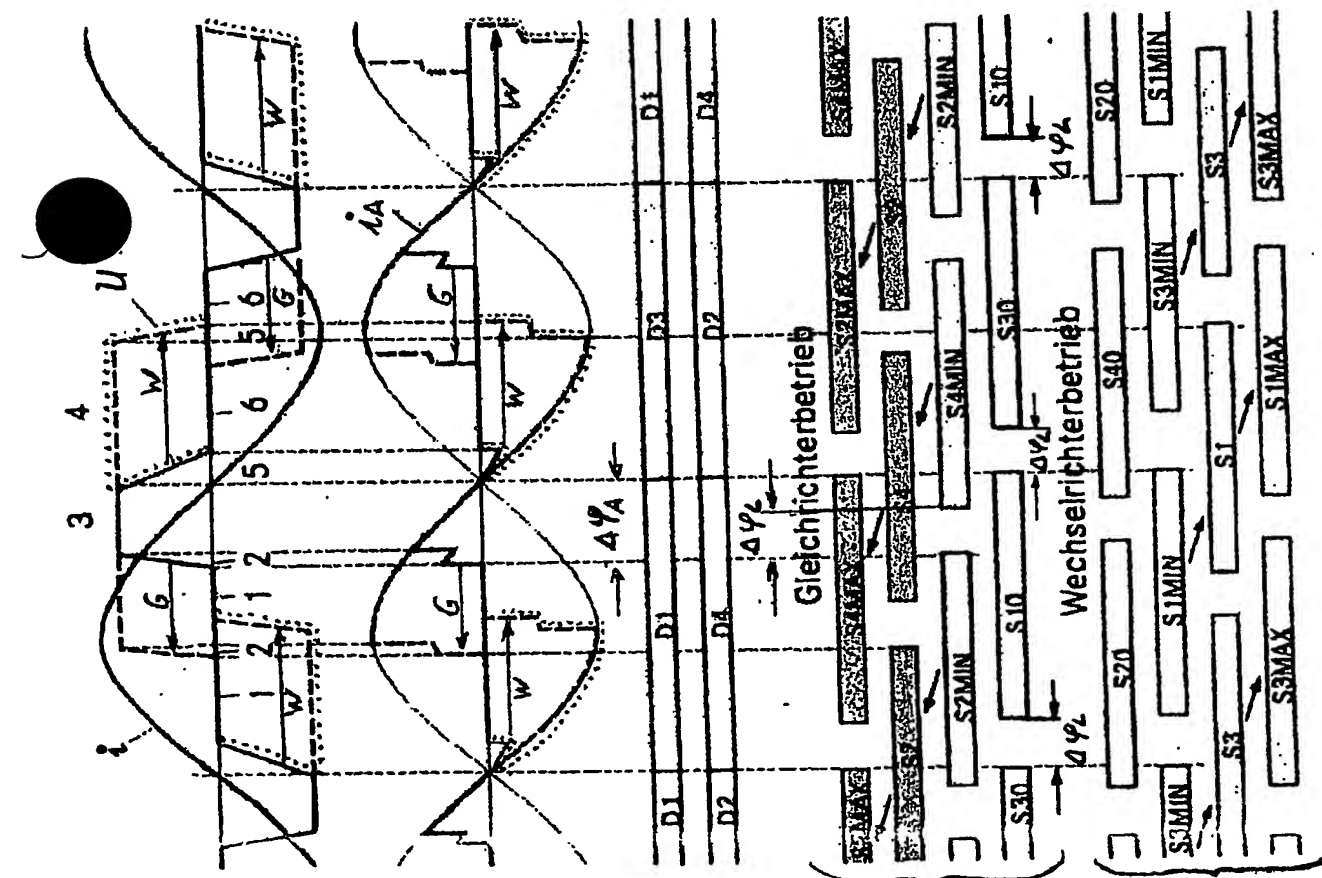
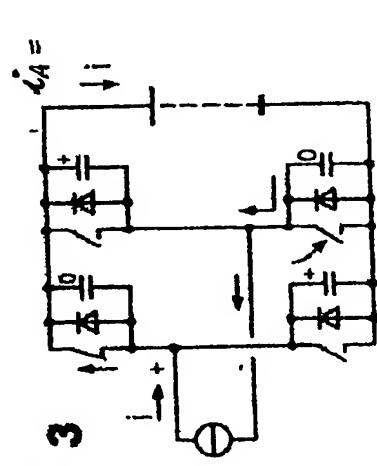
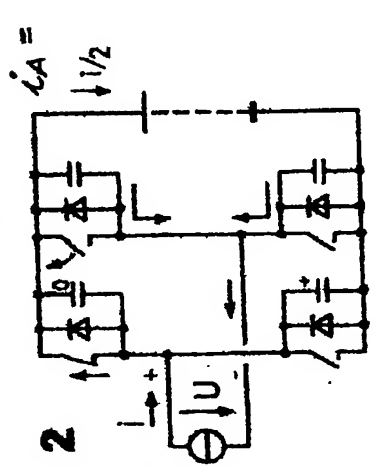
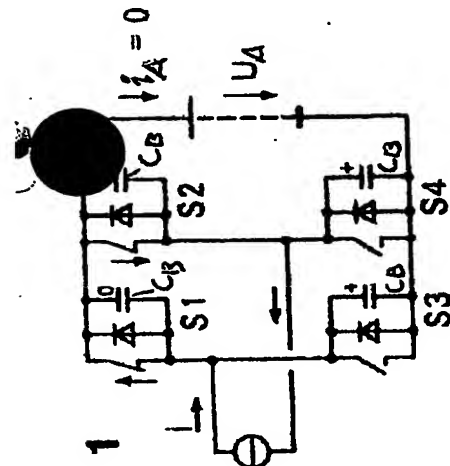
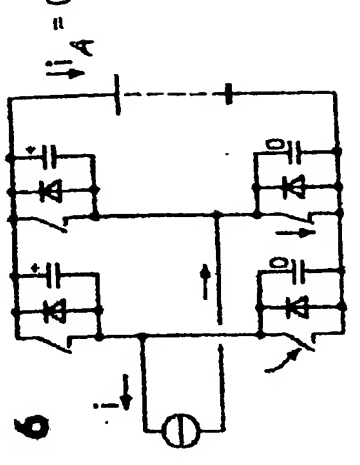
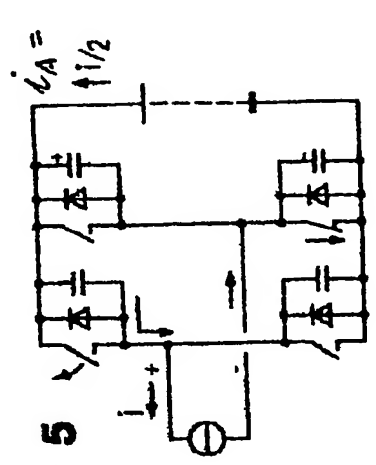
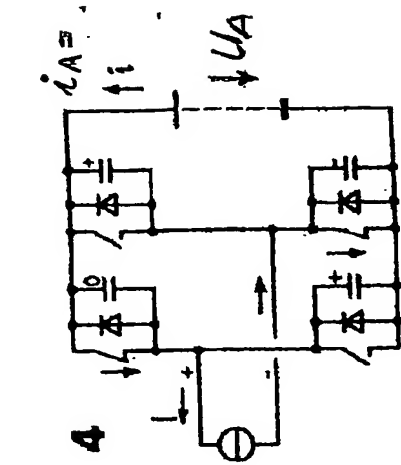
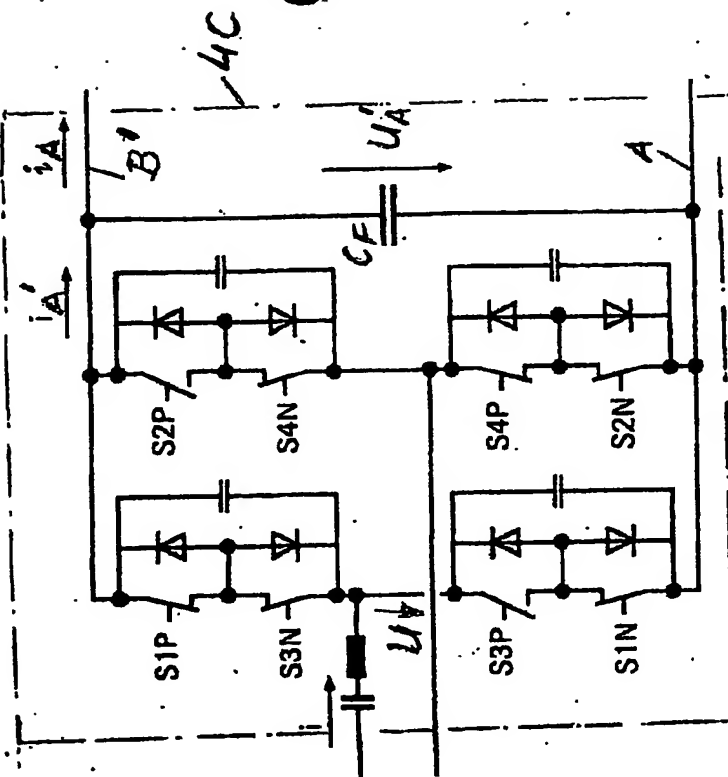


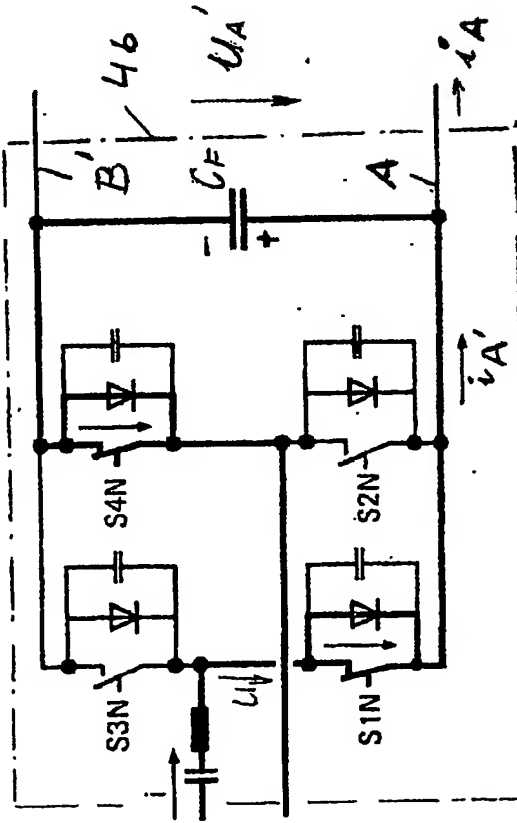
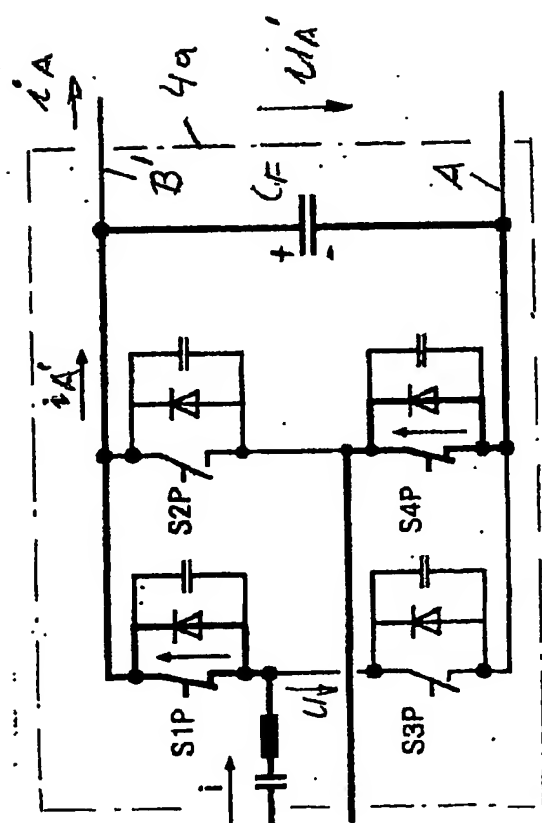
Fig. 3





SxP: Schalter für positive Ausgangsspannung
SxN: Schalter für negative Ausgangsspannung

Fig. 4



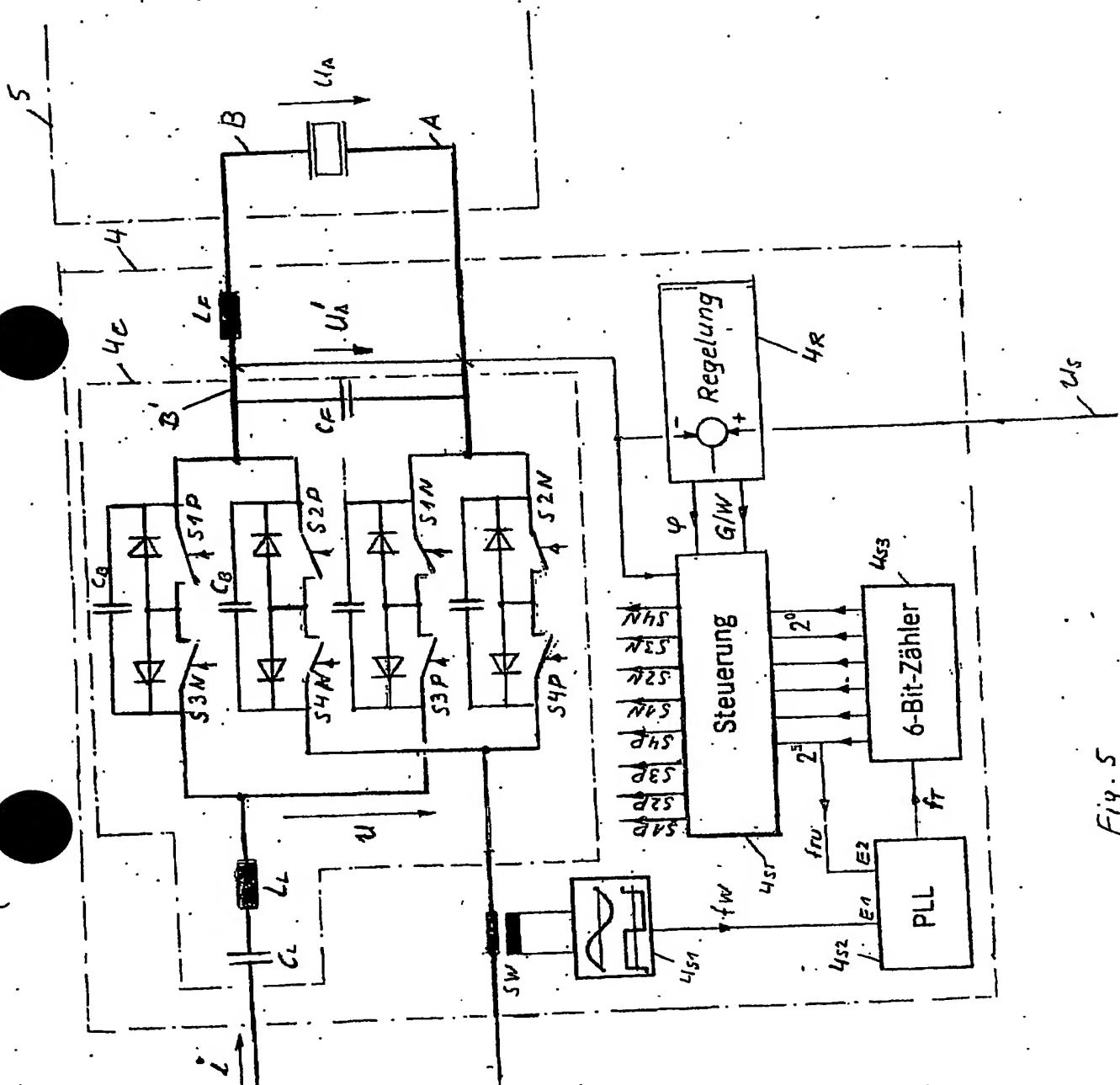
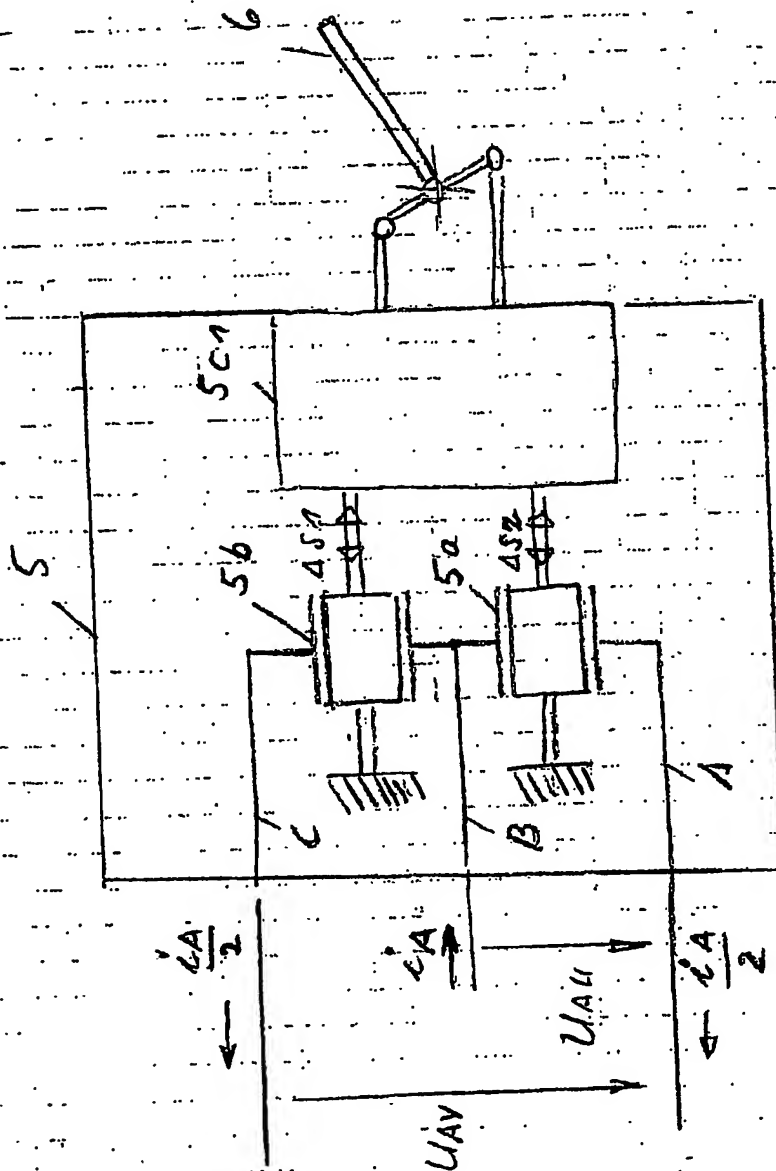


Fig. 5



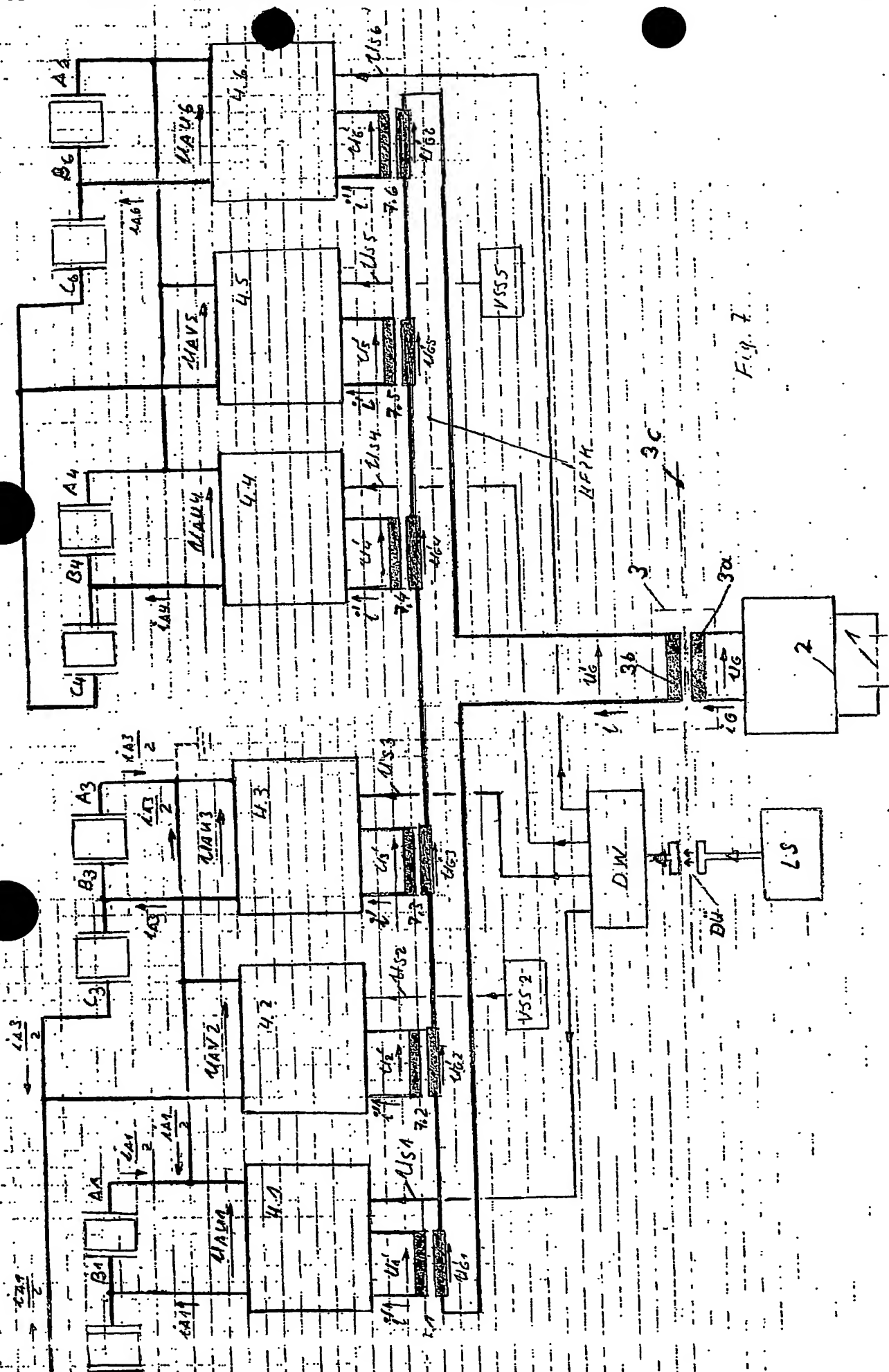


Fig. 8

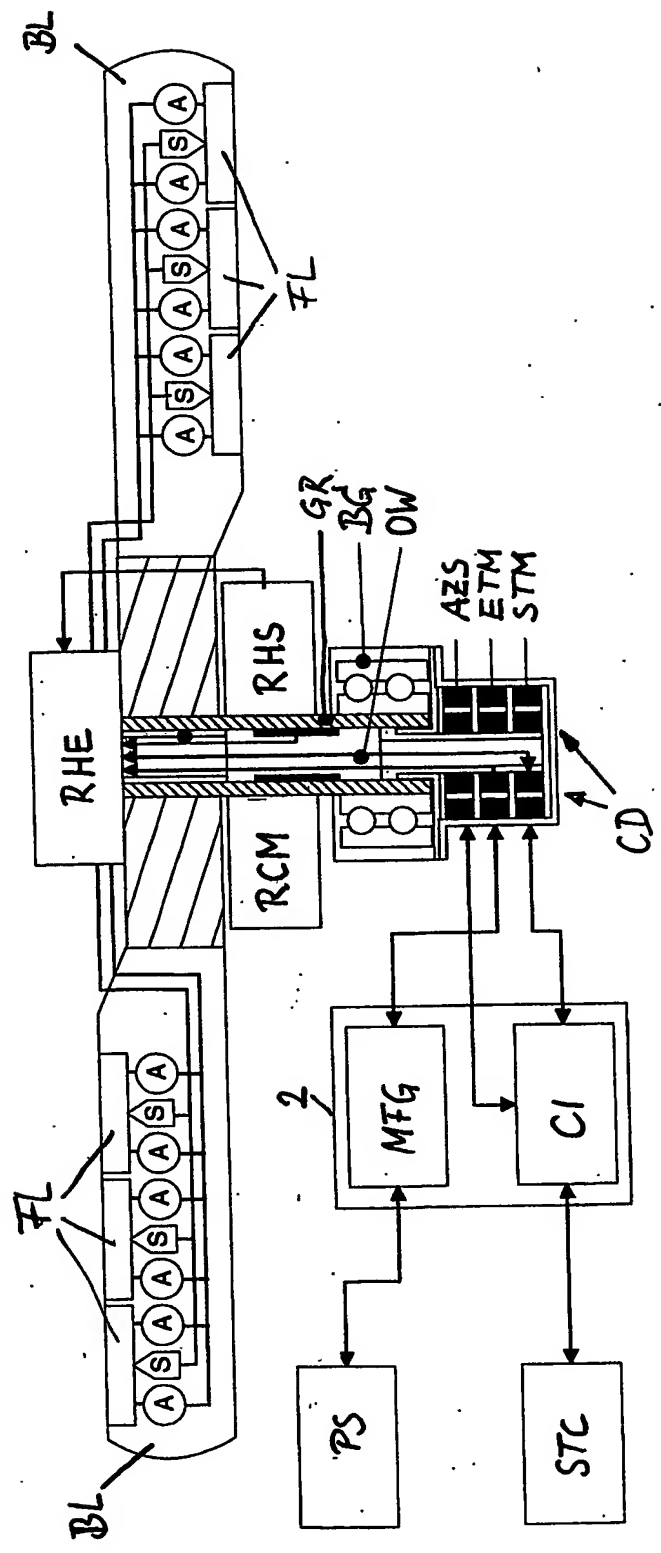
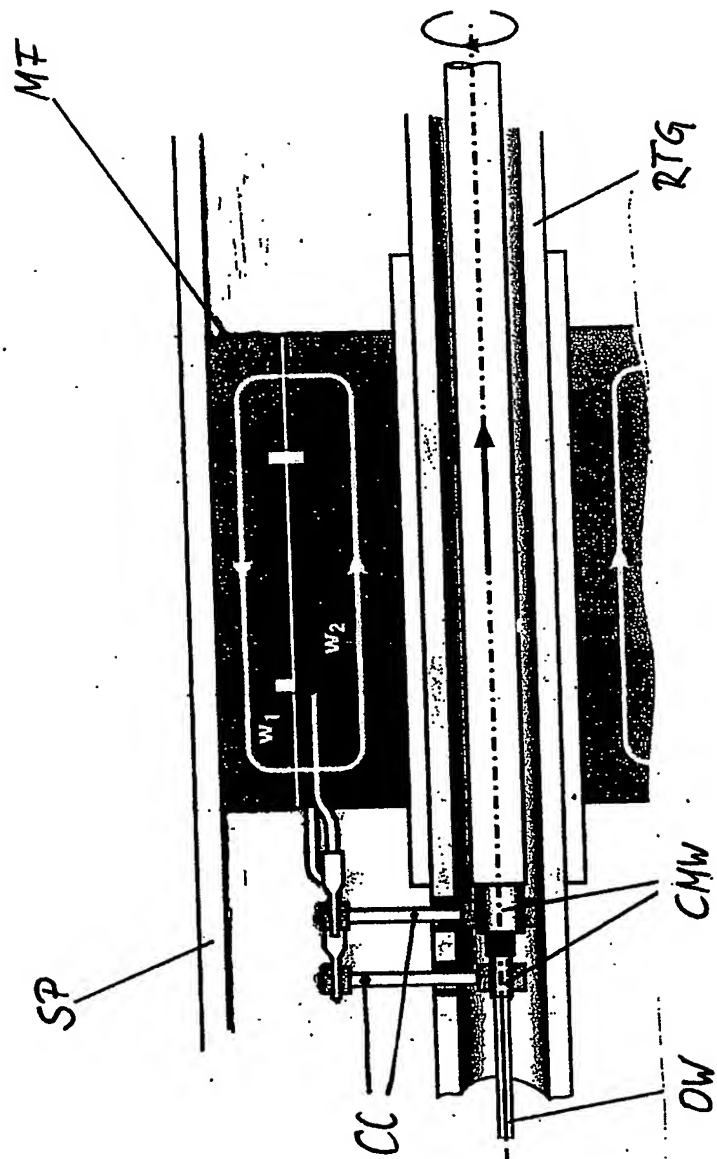


Fig. 9



Verfahren und Anordnung zum Übertragen und Einstellen der Energie kapazitiver Aktuatoren

5

Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Anordnungen zum Übertragen und
10 Einstellen der elektrischen Ladung und Energie von piezoelektrischen Aktuatoren, die
vorzugsweise auf bewegbaren Systemen angeordnet sind, zu denen eine elektrisch
leitende Verbindung gar nicht oder nur mit erheblichen Schwierigkeiten zu realisieren
ist. Hierbei wird durch einen Frequenzgenerator ein Wechselstrom höherer Frequenz
mit von der Phasenlage und der Amplitude einer Gegenspannung unabhängigen
15 Amplitude erzeugt und mittels eines induktiven Übertragers auf ein bewegbares
Teilsystem übertragen. Der von der Sekundärwicklung des Übertragers ausgehende
höherfrequente Wechselstrom i wird mittels einer elektronischen Stelleinrichtung
getrennt nach positiven und negativen Halbschwingungen oder Abschnitten von diesen
Halbschwingungen in derjenigen Richtung in den Aktuator eingeprägt, dass in jeder
20 Halbschwingung eine Längenänderung des Aktuators in einer gewünschten Richtung
auftritt.

25

(Fig. 1)

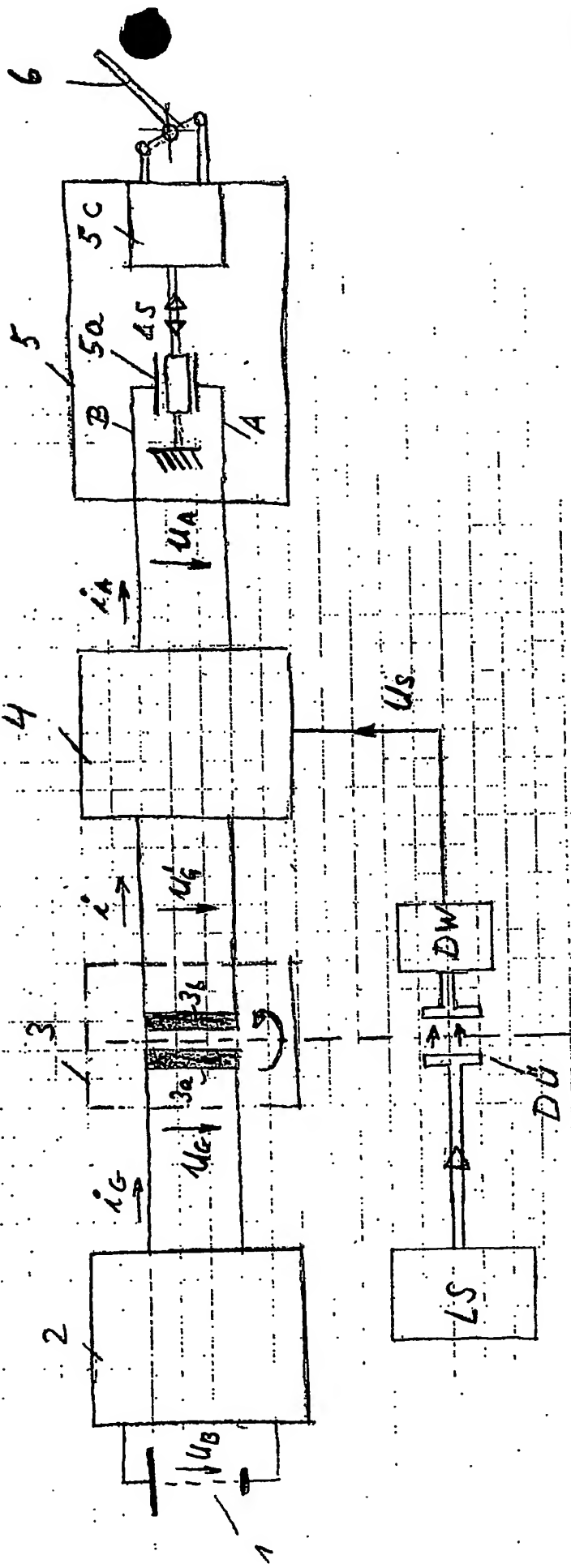


Fig. 1

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.